

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

*Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні
технології*

№ 62 (1035) 2013

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2013

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 62 (1035). – 160 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою Президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.;
П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;
М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора: О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: М. І. Безменов, канд. техн. наук, проф.

Члени редакційної колегії: І. П. Гамаюн, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.; О. В. Сфімов, д-р техн. наук, проф.;

І. В. Кононенко, д-р техн. наук, проф.; Л. М. Любчик, д-р техн. наук, проф.;

Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.; В. П. Северин, д-р техн. наук, проф.;

Н. В. Шаронова, д-р техн. наук, проф.; М. О. Ястребенецький, д-р техн. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Системний аналіз, управління та інформаційні технології», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 22 листопада 2013 р.

Ю. И. ДОРОФЕЕВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
А. С. КУЦЕНКО, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАПАСАМИ В СЕТЯХ ПОСТАВОК С ОГРАНИЧЕНИЯМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО СПРОСА

Рассматривается задача синтеза стратегии управления запасами в сетях поставок со структурными ограничениями в условиях действия неопределенного стохастического спроса. Закон управления строится в виде линейной обратной связи по отклонению текущего уровня запасов от страхового уровня, который вычисляется в режиме *on-line* на основании данных об объемах прошлых продаж. На основе метода инвариантных эллипсоидов задача представляется в терминах линейных матричных неравенств, а синтез управления сводится к задачам одномерной выпуклой оптимизации и полуопределенного программирования.

Ключевые слова: сеть поставок, стратегия управления запасами, метод инвариантных эллипсоидов, линейное матричное неравенство, задача полуопределенного программирования.

Введение. Сеть поставок представляет собой систему, состоящую из совокупности взаимосвязанных объектов, осуществляющих добычу сырья, производство, хранение, транспортировку и распределение ресурсов с целью удовлетворения потребительского спроса [1]. Обычно сеть поставок представляют в виде ориентированного графа, вершины которого, соответствующие узлам сети, определяют виды и объемы управляемых запасов, а дуги представляют управляемые и неуправляемые потоки в сети. Управляемые потоки описывают процессы переработки и перераспределения ресурсов между узлами сети и процессы поставок сырья извне. Неуправляемые потоки описывают спрос на ресурсы, который формируется внешними потребителями.

С точки зрения управления сетью поставок объемы спроса, поступающие из внешней среды и формирующие неуправляемые потоки в сети, можно рассматривать в качестве внешних возмущающих воздействий.

В настоящее время для синтеза стратегии управления запасами с заданной моделью спроса широко применяется метод прогнозирующего управления (*Model Predictive Control, MPC*) [2], который позволяет строить управление как в программном виде, так и в виде обратной связи, а также учитывать ограничения на состояния и управления. Однако, на практике, как правило, отсутствует информация, необходимая для построения адекватной модели спроса, которая используется при реализации прогнозирующего управления.

В работе [3] была предложена концепция «неизвестных, но ограниченных» воздействий (*unknown-but-bounded inputs, UBB*). Отметим, что начиная с [3] описание возмущений с помощью концепции *UBB* широко используется во многих областях и приложениях теории автоматического

© Ю. И. Дорофеев, А. С. Куценко, 2013

управления. При этом соответствующая модель *UBB* спроса характеризуется интервальной неопределенностью.

Альтернативой использованию детерминированных моделей является подход на основе моделей со стохастическим спросом, критерием перехода к которым считается значение коэффициента вариации (отношение среднеквадратического отклонения к среднему спросу), превышающее значение 0,2 [4].

В работах, использующих *MPC*-стратегию, стохастические аддитивные возмущения рассматриваются как независимые и одинаково распределенные случайные величины (*independent and identically distributed, i.i.d.*) с известной функцией распределения. Однако на практике очень сложно получить плотность распределения спроса ввиду неконтролируемого изменения механизма ее формирования по множеству трудно прогнозируемых причин. В связи с этим возникает необходимость разработки методов управления запасами в условиях отсутствия какой-бы то ни было априорной информации о внешнем спросе.

В задачах управления запасами наиболее естественно контролировать текущий спрос по уровню продаж. В литературе подход, в соответствии с которым решение о размерах пополнения запасов принимается в каждый момент времени, основываясь только на данных об объемах прошлых продаж, получил название «*censored demand*» [5].

Одним из подходов к данной проблематике в современной теории управления является концепция инвариантных множеств [6]. Среди различных форм инвариантных множеств особо выделяются эллипсоиды вследствие их простой структуры и прямой связи с квадратичными функциями Ляпунова. В работе [7] на основе *MPC*-подхода предложена стратегия управления, которая гарантирует ограниченность состояний замкнутой системы путем оценки множества достижимости с помощью построения вложенных эллипсоидальных множеств. Однако, полученная стратегия применима лишь в случае, когда ограничения на состояния и управления являются симметричными относительно начала координат (то есть допускают отрицательные значения), в то же время для задач управления сетями поставок характерно наличие жестких структурных несимметричных ограничений.

Целью настоящей работы является синтез стратегии управления запасами в сетях поставок со структурными ограничениями в условиях неопределенного стохастического спроса при наличии асимметричных ограничений на состояния и управления.

Постановка задачи. Для математического описания управляемой сети поставок используется дискретная модель в пространстве состояний. Переменными состояний являются наличные уровни запаса ресурсов. В качестве управляющих воздействий рассматриваются объемы заявок на поставку ресурсов, которые формируются узлами сети в текущем периоде.

Предполагается, что структура сети поставок известна, состояния доступны непосредственному измерению, а длительности транспортировки ресурсов между узлами и длительности переработки ресурсов, известны и кратны выбранному периоду дискретизации. Тогда сеть поставок описывается разностным уравнением с запаздыванием:

$$x(k+1) = x(k) + \sum_{t=0}^{\Lambda} B_t u(k-t) + Ed(k), \quad k = 0, 1, \dots, \quad (1)$$

где $x(k) \in \mathbf{R}^n$ и $u(k) \in \mathbf{R}^m$ – векторы состояний и управляющих воздействий;

$d(k) \in \mathbf{R}^q$ – вектор внешних возмущений, элементы которого рассматриваются как *i.i.d.* случайные величины с неизвестной функцией распределения;

Λ – максимальное значение запаздывания управляемых потоков среди всех пар взаимосвязанных узлов сети;

$B_t \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $t = \overline{0, \Lambda}$ – матрицы влияния управлений;

$E \in \mathbf{R}^{n \times q}$ – матрица влияния возмущений.

Очевидно, что структура сети определяется матрицами B_t , E , методика построения которых изложена в работе [8].

В процессе функционирования системы должны выполняться заданные структурные ограничения:

$$x(k) \in X = \{x \in \mathbf{R}^n : 0 \leq x \leq x^+\}, \quad (2.a)$$

$$u(k) \in U = \{u \in \mathbf{R}^m : 0 \leq u \leq u^+\}, \quad (2.b)$$

где x^+ и u^+ – векторы, определяющие максимальные вместимости хранилищ узлов сети и максимальные объемы транспортировок, которые считаются заданными.

Множества X , U представляют собой ограниченные многогранники, которые определяются пересечением конечного числа замкнутых полупространств, т.е. представляют собой компактные выпуклые множества, при этом $0 \notin \text{int}(X)$, $0 \notin \text{int}(U)$.

Для системы (1) рассматривается задача синтеза стратегии управления запасами, которая для любого начального состояния $x(0) \in X$ и неопределенного стохастического внешнего спроса обеспечивает:

1) минимизацию квадратичного критерия качества, задающего суммарные потери от отклонения текущего уровня запасов ресурсов от выбранного страхового уровня;

2) асимптотическую устойчивость замкнутой системы;

3) выполнение ограничений на состояния и управления (2).

Условие существования стратегии управления. Первым этапом решения задачи управления является преобразование модели (1) к стандартному виду без запаздываний на основе расширения вектора состояний [3] путем включения в него векторов объемов ранее заказанных ресурсов, находящихся в процессе транспортировки и переработки $\xi(k) = [x(k)^T, u(k-1)^T, u(k-2)^T, \dots, u(k-\Lambda)^T]^T$.

Тогда уравнения «расширенной» модели сети поставок примут вид:

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A\xi(k) + Bu(k) + Gd(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \end{aligned} \quad (3)$$

где матрицы $A \in \mathbf{R}^{(n+\Lambda m) \times (n+\Lambda m)}$, $B \in \mathbf{R}^{(n+\Lambda m) \times m}$, $G \in \mathbf{R}^{(n+\Lambda m) \times q}$, $C \in \mathbf{R}^{n \times (n+\Lambda m)}$ имеют соответствующую блочную структуру [8].

Необходимыми условиями существования стратегии управления, обеспечивающей для любого $k \geq 0$ полное удовлетворение спроса, являются [9]:

1) условие управляемости пары матриц (A, B) ;

2) условие достаточности ресурсов управления, которое допускает следующую геометрическую интерпретацию: выпуклый многогранник, описывающий влияние внешних возмущений, находится строго внутри выпуклого многогранника, описывающего ограничения на ресурсы управления:

$$ED \subset -BU, \quad (4)$$

где D – множество, аппроксимирующее множество возможных значений внешнего спроса $d(k)$, $k \geq 0$.

Согласно теореме об аппроксимации произвольных выпуклых множеств, не обладающих свойством симметрии относительно начала координат [10], множество значений внешнего спроса может быть аппроксимировано эллипсоидом:

$$E(d^*(k), P_d(k)) = \left\{ d \in \mathbf{R}^q : (d(k) - d^*(k))^T P_d(k)^{-1} (d(k) - d^*(k)) \leq 1 \right\} \quad (5)$$

где $d^*(k) \in \mathbf{R}^q$ – вектор, определяющий центр эллипсоида, элементы которого вычисляются как средние значения объемов прошлых продаж $d(k-1), d(k-2), \dots, d(0)$;

$P_d(k) \in \mathbf{R}^{q \times q}$ – матрица, диагональные элементы которой определяют полуоси эллипсоида и вычисляются на основании значений дисперсии объемов прошлых продаж.

Поскольку предполагается, что внешний спрос на каждый вид ресурсов является дискретной случайной величиной с одинаковыми вероятностями

появления различных значений, то для вычисления его средних значений может быть применена следующая формула:

$$d^*(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} d(i). \quad (6)$$

Тогда для вычисления средних значений спроса в режиме *on-line* предлагается рекуррентная формула:

$$d^*(k) = \frac{k-1}{k} d^*(k-1) + \frac{1}{k} d(k-1), \quad d^*(1) = d(0). \quad (7)$$

Для вычисления несмещенной оценки дисперсии спроса применяется формула:

$$D^*(k) = \frac{1}{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} (d(i) - d^*(k))^2, \quad (8)$$

которая может быть представлена в рекуррентном виде:

$$D^*(k) = \frac{k-2}{k-1} D^*(k-1) + \frac{1}{k-1} (d(k-1) - d^*(k))^2, \quad D^*(1) = 0. \quad (9)$$

После вычисления дисперсии спроса вычисляется матрица аппроксимирующего эллипсоида:

$$P_d(k) = \text{diag}(q^2 D_1^*(k), \dots, q^2 D_q^*(k)) \quad (10)$$

Синтез базовой MPC-стратегии управления. Базовый метод синтеза MPC-стратегии управления [2] основан на решении оптимизационной задачи, в которой последовательность управляющих воздействий вычисляется в каждый дискретный момент времени так, чтобы минимизировать некоторую функцию стоимости, которая определяется прогнозируемыми состояниями системы в течение некоторого временного горизонта. После определения последовательности управляющих воздействий только первый ее элемент используется в качестве управления в текущий момент времени. Затем измеряется новое состояние системы и процедура повторяется, используя принцип отступающего горизонта.

Поскольку имеют место ограничения (2), то найти общее решение оптимизационной задачи в аналитическом виде невозможно, поэтому задача представляется в виде задачи квадратичного программирования (*Quadratic Programming*) и решается численно в режиме *on-line*.

Известно [2], что базовая MPC-стратегия управления с конечным значением горизонта прогнозирования не гарантирует устойчивость по Ляпунову замкнутой системы. В результате возникает необходимость

модификации подхода для синтеза стабилизирующего управления запасами в сетях поставок в случае бесконечного временного горизонта.

Синтез стабилизирующего управления на основе метода инвариантных эллипсоидов. Целью является построение закона управления, который должен обеспечивать стабилизацию замкнутой системы, а также подавление влияния неизвестного внешнего спроса $d(k) \in E(d^*(k), P_d(k))$ путем минимизации функционала, построенного для инвариантного множества состояний системы.

Выберем закон управления аналогично случаю детерминированного спроса [11] в виде линейной обратной связи по сигналу рассогласования между наличным и страховым уровнями запаса:

$$u(k) = K(k)(\xi(k) - \xi^*(k)), \quad k \geq 0, \quad (11)$$

где $\xi^*(k)$ – вектор, определяющий уровень страховых запасов (*safety stock level*) в момент времени k , значения которого вычисляются на основе данных об объемах прошлых продаж с учетом теоремы об аппроксимации произвольных выпуклых множеств:

$$\xi^*(k) = [x^*(k)^T, \dots, x^*(k)^T]^T, \quad x_i^*(k) = \begin{cases} qd_i^*(k), & i = \overline{1, q}, \\ (I - \Pi)^{-1} \bar{d}, & i = \overline{q+1, n}, \end{cases} \quad \bar{d}_j = \begin{cases} d_j^*(k) + \sqrt{D_j^*(k)}, & j = \overline{1, q}, \\ 0, & j = \overline{q+1, n}, \end{cases} \quad (12)$$

где Π – технологическая матрица, значение элемента $\Pi_{i,j}$ которой равно количеству единиц ресурса i , необходимого для производства единицы ресурса j .

Тогда расширенную модель замкнутой системы для управления (11) представим в виде:

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A_f(\xi(k) - \xi^*(k)) + A\xi^* + G(d(k) - d^*(k)) + Gd^*(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \quad A_f = A + BK. \end{aligned} \quad (13)$$

Заметим, что вектор выходов $x(k)$ модели (13) является вектором состояний исходной модели сети поставок (1).

Стабилизирующие MPC-алгоритмы, как правило, основаны на оценивании верхнего граничного значения показателя качества с помощью функции Ляпунова.

Запишем критерий качества в случае бесконечного горизонта:

$$J_\infty(k) = \sum_{k=0}^{\infty} \left((\xi(k) - \xi^*(k))^T R_\xi (\xi(k) - \xi^*(k)) + u(k)^T R_u u(k) \right), \quad (14)$$

где $R_\xi \succ 0, R_u \succ 0$ – весовые матрицы соответствующих размерностей.

Определим «смещенную» квадратичную функцию Ляпунова, построенную на решениях системы (13):

$$V(\xi(k) - \xi^*(k)) = (\xi(k) - \xi^*(k))^T P (\xi(k) - \xi^*(k)), \quad P = P^T \succ 0. \quad (15)$$

Известно, что существование невозрастающей функции Ляпунова (15) для всех моментов времени $k \geq 0$, то есть выполнение следующего условия

$$\begin{aligned} & V(\xi(k+1) - \xi^*(k+1)) - V(\xi(k) - \xi^*(k)) \leq \\ & - \left((\xi(k) - \xi^*(k))^T R_\xi (\xi(k) - \xi^*(k)) + u(k)^T R_u u(k) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы (13).

Если (16) выполняется, тогда можно показать, что $V(\xi(k) - \xi^*) \geq \max_{d(k) \in E(d^*(k), P_d(k))} J_\infty(k)$, то есть функция (15) дает оценку сверху значения критерия качества в случае бесконечного горизонта (14), определенного матрицами R_ξ, R_u [12].

Тогда задача синтеза управления сводится к вычислению управляющего воздействия, которое минимизирует значение функции Ляпунова $u(k) = \arg \min_{u(k) \in U} V(\xi(k) - \xi^*)$ или к эквивалентной задаче вычисления минимального скалярного значения $\gamma > 0$ такого, что

$$(\xi(k) - \xi^*(k))^T P (\xi(k) - \xi^*(k)) \leq \gamma, \quad k \geq 0.$$

В соответствии с [12] введем матричную переменную

$$Q = \gamma P^{-1} \quad (17)$$

и получим эквивалентную задачу

$$\min_Q \gamma, \quad \text{при условии} \quad (\xi(k) - \xi^*)^T Q^{-1} (\xi(k) - \xi^*) \leq 1, \quad (18)$$

которую можно трактовать как задачу минимизации по критерию следа инвариантного эллипсоида для системы (13). Используя лемму Шура, задачу (18) можно представить в виде задачи полуопределенного программирования:

$$\min_Q \gamma, \quad \text{при условии} \quad Q \succ 0, \quad \begin{bmatrix} 1 & (\xi(k) - \xi^*)^T \\ (\xi(k) - \xi^*) & Q \end{bmatrix} \succeq 0. \quad (19)$$

По аналогии с [11] представим условие (16), а также ограничения (2) в виде линейных матричных неравенств. Чтобы матричные неравенства оказались линейными относительно матриц Q и $K(k)$, согласно [12] вводится матричная переменная $Y = K(k)Q$. Тогда задача синтеза управления заключается в вычислении матрицы коэффициентов обратной связи $K(k)$, которая для любого начального состояния $x(0) \in X$ и произвольного внешнего спроса $d(k) \in E(d^*(k), P_d(k))$ стабилизирует замкнутую систему (13) и обеспечивает минимизацию функции Ляпунова (15). Соответствующий результат представлен следующей теоремой.

Теорема. Рассмотрим систему (1) с ограничениями (2) и пусть матрицы $P = \gamma Q^{-1}$ и $K(k) = YQ^{-1}$ получены в результате решения задач одномерной выпуклой оптимизации по скалярному параметру α и полуопределенного программирования вида:

$$\min_{\alpha, Q, Y} \gamma, \quad \text{при условии } Q \succ 0, \quad \begin{bmatrix} 1 & (\xi(k) - \xi^*(k))^T \\ * & Q \end{bmatrix} \succeq 0,$$

$$\begin{bmatrix} Q & 0 & 0 & (AQ + BY)^T & 0 & 0 & QR_\xi^{1/2} & Y^T R_u^{1/2} \\ * & 0 & 0 & (A - I)^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & 0 & G^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & Q & G & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & 0 & P_d(k)^{1/2} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & \frac{\gamma}{\alpha} I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \gamma I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & \gamma I \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma(u^+_{j})^2 & Y_j \\ * & Q \end{bmatrix} \succeq 0, \quad j = \overline{1, m}, \quad \begin{bmatrix} \gamma(x^+_{l})^2 & C_l \\ * & Q \end{bmatrix} \succeq 0, \quad l = \overline{1, n}.$$

Если задача (20) имеет решение, то система (1), замкнутая с помощью закона управления (11) для любого начального состояния $x(0) \in X$ и неопределенного стохастического внешнего спроса $d(k) \in E(d^*(k), P_d(k))$, является асимптотически устойчивой и удовлетворяет ограничениям (2).

Доказательство теоремы приведено в работе [11].

После решения задачи (20) найденное управляющее воздействие $u(k) = K(k)(\xi(k) - \xi^*(k))$ применяется для управления сетью поставок в момент времени k . В следующий момент времени измерятся новое значение

вектора состояний $\xi(k+1)$ и соответствующие задачи полуопределенного программирования и одномерной выпуклой оптимизации решаются в режиме *on-line* для вычисления нового значения матрицы $K(k)$.

Численный пример. В качестве примера рассмотрим сеть поставок, которая изучалась в работе [4]. Модель сети описывается графом $G(V, E) = (V = \{1, 2, 3\}, E = \{(2,1), (2,3), (3,1)\})$. Заданы значения времени выполнения заказа в узлах сети: $T_1 = T_2 = 2$, $T_3 = 1$ и времени транспортировки ресурсов между узлами сети: $T_{2,1} = T_{3,1} = T_{2,3} = 1$. По формуле $\Lambda_i = \max\{T_{j,i} + T_i, i, j = \overline{1,3}\}$ определим величины запаздывания материальных потоков всех узлов сети, в результате получим $\Lambda = 3$.

Представим управляемые потоки u_1 и u_3 в виде гипердуг, а также добавим поток u_2 , который описывает поставки сырья извне (см. рис. 1). Дуги d_1, d_2 , изображенные пунктирными линиями, представляют внешний спрос. Значение времени транспортировки $T_{i,j}$ и количество единиц продукции $\Pi_{i,j}$, которое требуется в соответствии с технологическим процессом, указаны для каждого управляемого потока в круглых и квадратных скобках, соответственно. Возле каждого узла в круглых скобках указаны значения времени выполнения заказа T_i .

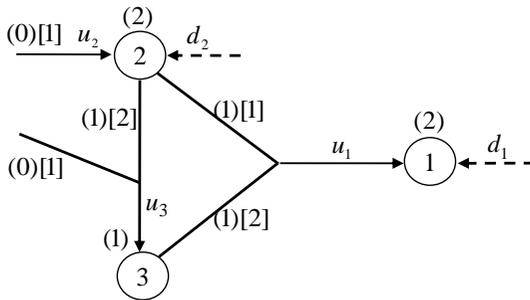


Рис. 1 – Графическое представление модели сети поставок

Специфика рассматриваемой сети в том, что на узел 1 действует только внешний спрос; на узел 2 действует как внешний, так и внутренний спрос со стороны узлов 1 и 3; на узел 3 – только внутренний спрос со стороны узла 1.

Заданы максимальные вместительности хранилищ сети и объемы транспортировок $x^+ = [100 \ 400 \ 100]^T$, $u^+ = [30 \ 200 \ 50]^T$, а также начальные условия $x(0) = [100 \ 350 \ 80]^T$.

В результате проверки установлено, что пара матриц (A, B) является управляемой, а условие существования стратегии управления (4) выполняется. Весовые матрицы выбраны равными $R_{\xi} = \text{diag}(r_{\xi}, \dots, r_{\xi})$, $R_u = \text{diag}(r_u, r_u, r_u)$, где $r_{\xi} = 40$, $r_u = 5$.

Численное решение задачи получено с помощью свободно распространяемого пакета CVX for MATLAB [13]. Моделирование осуществлялось в течение 15 периодов. Значения внешнего спроса моделировались как нормально распределенные случайные величины с изменяющимся средним значением $d_1 \rightarrow N(\text{mean}_1, 4)$, $\text{mean}_1 \in [25, 5]$, $d_2 \rightarrow N(\text{mean}_2, 15)$, $\text{mean}_2 \in [25, 45]$. Результаты моделирования при $\alpha = 0.999$ представлены на рис. 2-4.

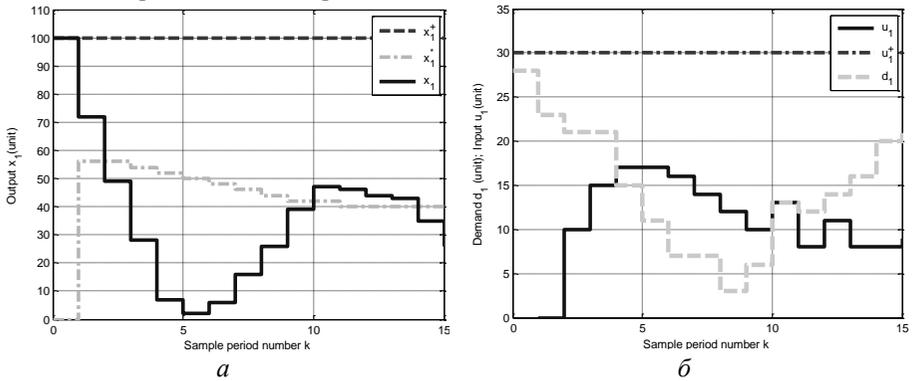


Рис. 2 – Для узла 1: а – значения наличного и страхового уровней запасов; б – значения управляющих воздействий и внешнего спроса

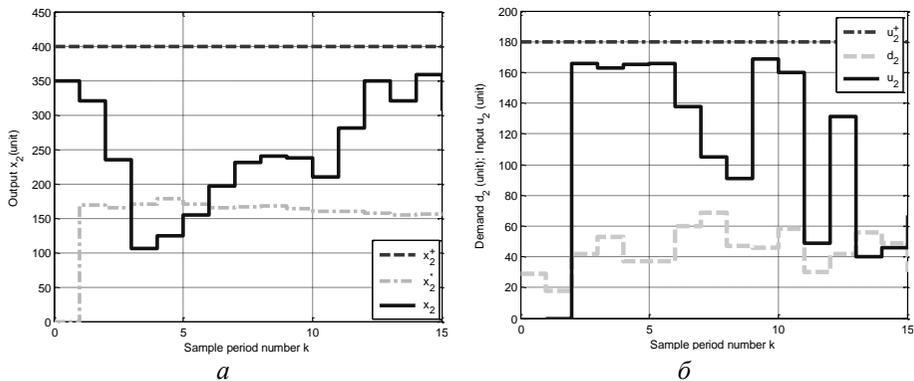


Рис. 3 – Для узла 2: а – значения наличного и страхового уровней запасов; б – значения управляющих воздействий и внешнего спроса

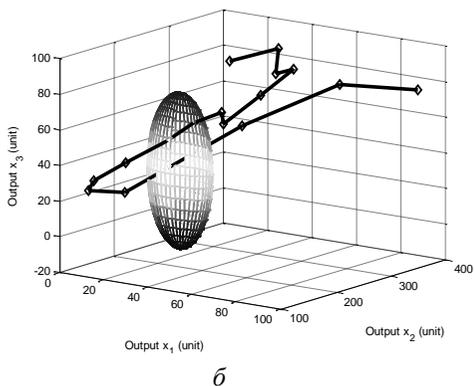
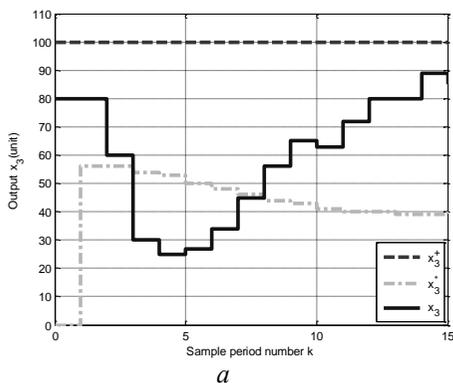


Рис. 4: *a* – значения наличного и страхового уровней запасов узла 3;
б – фазовая траектория системы и инвариантный эллипсоид,
полученный на одном из шагов

Выводы. В работе предложен подход к решению задачи синтеза стратегии управления запасами в сетях поставок в условиях действия неопределенного стохастического спроса при наличии ограничений на состояния и управления. Соответствующий закон управления строится в виде линейной обратной связи по сигналу рассогласования между наличным и страховым уровнями запаса.

Значения страховых уровней запаса ресурсов оказывают существенное влияние на величину управляющих воздействий и качество функционирования всей системы. Их вычисление осуществляется в режиме *on-line* на основании данных об объемах прошлых продаж в предположении, что внешний спрос на каждый вид ресурсов является дискретной случайной величиной с одинаковыми вероятностями появления различных значений.

Для подавления влияния внешнего спроса на уровень наличных запасов, одновременно с обеспечением устойчивости замкнутой системы, применена методика инвариантных эллипсоидов, которая позволила сформулировать задачу в терминах линейных матричных неравенств, а синтез управления свести к задачам полуопределенного программирования и одномерной выпуклой оптимизации. Результаты численного моделирования свидетельствуют об эффективности предложенного подхода

Список литературы: 1. Лотоцкий В. А. Модели и методы управления запасами / В. А. Лотоцкий, А. С. Мандель. – М.: Наука, 1991. – 189 с. 2. Vemporad A. Robust model predictive control: a survey / A. Vemporad, M. Morari // Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 1999. – Vol. 245. – P. 207–226. 3. Bertsekas D. P. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty / D. P. Bertsekas, I. Rhodes // IEEE Trans. Automat. Control. – 1971. – Vol. 16. – P. 117–128. 4. Рыжиков Ю. И. Теория очередей и управление запасами / Ю. И. Рыжиков. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с. 5. Huh W. T. A nonparametric asymptotic analysis of inventory planning with censored demand / W. T. Huh, R. Paat // Mathematics of Operations Research. – 2009. – Vol. 34. –

P. 103–123. **6.** *Blanchini F.* Set theoretic methods in control / *F. Blanchini, S. Miani.* – Boston: Birkhauser. – 2008. **7.** *Cannon M.* Probabilistic constrained MPC for multiplicative and additive stochastic uncertainty / *M. Cannon, B. Kouvaritakis, D. Ng* // IEEE Trans. Autom. Control. – 2009. – Vol. 54(7). – P. 747–753. **8.** *Дорофеев Ю. И.* Анализ распределенных сетей поставок как объектов автоматического управления / *Ю. И. Дорофеев, А. А. Никульченко* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 29. – С. 15–22. **9.** *Blanchini F.* Least inventory control of multistorage systems with non-stochastic unknown inputs / *F. Blanchini, F. Rinaldi, W. Ukovich* // IEEE Trans. on robotics and automation. – 1997. – Vol. 13. – P. 633–645. **10.** *Чернуосько Ф. Л.* Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / *Ф. Л. Чернуосько.* – М. : Наука, 1988. – 320 с. **11.** *Lyubchyk L. M.* Robust model predictive control of constrained supply networks via invariant ellipsoids technique / *L. M. Lyubchyk, Y. I. Dorofiev, A. A. Nikulchenko* // Proc. IFAC Conf. on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM'2013. – 2013. – P. 1618–1623 // URL: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailled/60351.html>. **12.** *Kothare M. V.* Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities / *M. V. Kothare, V. Balakrishnan, M. Morari* // Automatica. – 1996. – Vol. 32(10). – P. 1361–1379. **13.** *Grant M.* CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 1.21 / *M. Grant, S. Boyd* // URL: <http://cvxr.com/cvx>.

Надійшла до редколегії 11.10.2013

УДК 681.5.01

Стабилизирующее управление запасами в сетях поставок с ограничениями в условиях неопределенного стохастического спроса / Ю. И. Дорофеев, А. С. Куценко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 3–14. – Бібліогр.: 13 назв.

Розглядається задача синтезу стратегії управління запасами в мережах поставок зі структурними обмеженнями в умовах дії невизначеного стохастичного попиту. Закон управління будеться у вигляді лінійного зворотного зв'язку за відхиленням поточного рівня запасів від страхового рівня, який обчислюється в режимі *on-line* на підставі даних про обсяги минулих продажів. На основі методу інваріантних еліпсоїдів задача видається в термінах лінійних матричних нерівностей, а синтез управління зводиться до задач одновимірної опуклою оптимізації та напіввизначеного програмування.

Ключові слова: мережа поставок, стратегія управління запасами, метод інваріантних еліпсоїдів, лінійна матрична нерівність, задача напіввизначеного програмування.

The inventory control strategy synthesis problem in the supply network with structural constraints under an uncertain stochastic demand is considered. The control law is constructed in the form of linear feedback based on mismatch between the current state and safety stock level, which is calculated *on-line* on the basis of censored demand data. The control problem is represented in terms of the Linear Matrix Inequalities based on the Invariant Ellipsoids method, and the control synthesis is reduced to the Semi-Definite Programming and the one-dimensional convex optimization.

Keywords: supply network, inventory control strategy, invariant ellipsoids method, linear matrix inequality, semi-definite programming.

А. А. НИКУЛЬЧЕНКО, ассистент кафедры КМММ НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ДИСТРИБУЦИИ ТОВАРОВ

Предлагается использование комбинированного метода динамического программирования и генетических алгоритмов для нахождения оптимального плана дистрибуции товаров в многономенклатурных системах с несколькими точками поставки и ограничениями на объемы поставок. Выполнена реализация предложенного алгоритма и проведены его испытания на реальных данных.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, динамическое программирование, задача дистрибуции товаров, многокритериальная задача упаковки рюкзака.

Введение. В условиях бурного развития средств связи и сети Интернет все больше и больше ритейлеров осознают необходимость в «online присутствии» для дальнейшего развития своего бизнеса и поддержания конкурентоспособности. В случае торговых сетей под «online присутствием» понимается наличие Интернет-магазина товаров и системы доставки этих товаров конечным потребителям. Для уменьшения затрат на доставку товаров конечным потребителям очень часто используется географически распределенная сеть складов, что позволяет удовлетворять заказы из складов географически расположенных близко к потребителю, и тем самым уменьшая затраты на доставку. Однако ближайший к потребителю склад может не обладать достаточным запасом товаров, чтоб удовлетворить все поступившие на него заказы, и в этом случае часть этих заказов необходимо будет удовлетворить с более географически удаленных складов, тем самым увеличивая суммарные затраты на доставку товаров. В итоге перед ритейлером встает задача оптимального распределения всех заказов между складами таким образом, чтобы каждый склад имел возможность удовлетворить отправленные ему заказы, и при этом суммарные затраты на доставку всех заказов из всех складов были минимальны.

В данной работе предложено использование комбинированного алгоритма динамического программирования и генетических алгоритмов для решения выше описанной оптимизационной задачи.

Анализ практически применяемых решений. На первом этапе был проведен анализ наиболее часто применяемого на практике алгоритма с целью оценки его оптимальности и определения необходимости его усовершенствования.

В настоящее время для решения данной задачи на практике применяется следующий «жадный» алгоритм:

- Все заказы выстраиваются в некотором порядке.

- На каждом шаге выбирается следующий заказ из списка, и находится ближайший склад способный удовлетворить заказ в полном объеме, с учетом наличного запаса товаров и распределенных ранее заказов. Процедура повторяется для следующего заказа в списке.
- Заказы, которые не удалось удовлетворить в полном объеме, разбиваются вручную на несколько складов.

Очевидно, что в случае наличия достаточных запасов на каждом из складов и возможности удовлетворить любой заказ из ближайшего склада предложенный жадный алгоритм будет давать оптимальное решение поставленной задачи. Однако анализ, проведенный на основе использования данного алгоритма для украинского дистрибьюра, компании ООО Фирма «СТВ», показал, что в среднем только 30% заказов удается удовлетворить с ближайшего склада, еще 40% получается удовлетворить в полном объеме с более удаленного склада, а оставшиеся 30% приходится разбивать на несколько складов. Данный анализ показывает неоптимальность используемого алгоритма и необходимость разработки алгоритма, позволяющего находить решения, с меньшей суммарной стоимостью доставки товаров.

Математическая модель и постановка задачи. Предположим, что на рассматриваемый момент времени перед нами стоит задача распределения m заказов содержащих n различных товаров по p складам.

Введем следующие обозначения:

$s_{i,k}$, $i = \overline{1, p}$, $k = \overline{1, n}$ – количество товара k на складе i ;

$o_{j,k}$, $j = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, n}$ – количество товара k в заказе j ;

$c_{i,j}$, $i = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$ – затраты на доставку заказа (или части заказа) j со склада i ;

$x_{i,j,k}$, $i = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, n}$ – количество единиц товара k которые планируется поставить со склада i для удовлетворения заказа j .

Тогда исходная задача может быть сформулирована как задача нахождения $x_{i,j,k}$, удовлетворяющих условиям:

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \operatorname{sgn} \left(\sum_{k=1}^n x_{i,j,k} \right) c_{i,j} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^p x_{i,j,k} = o_{j,k}, \quad \forall j = \overline{1, m}, \forall k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{i,j,k} \leq s_{i,k}, \quad \forall i = \overline{1, p}, \forall k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где (1) – условие выполнения всех заказов, (2) – условие не превышения доступных остатков товаров, а (3) – цель задачи дискретной оптимизации.

Описание комбинированного алгоритма решения задачи. Легко показать, что в случае существования только одного склада для удовлетворения заказов, поставленная задача аналогична *многокритериальной задаче упаковки рюкзака (multidimensional knapsack problem)* [1, 2]. Хорошо известно, что данная задача является NP-полной, что означает невозможность построения полиномиального алгоритма для ее решения. Наличие же нескольких (а на практике – достаточно большого количества) складов, а также возможность удовлетворения заказа из нескольких складов, делает невозможным применение методов динамического программирования (чаще используемых для решения задачи упаковки рюкзака) для получения близкого к оптимальному решению в разумные временные рамки.

К приближенным методам решения подобных оптимизационных задач относят генетические алгоритмы, эффективность применения которых была изучена в [3].

Для решения поставленной задачи предлагается применять комбинированный алгоритм, использующий методы динамического программирования и генетических алгоритмов. В терминах генетических алгоритмов каждое возможное распределение заказов по складам будем называть особью.

Вначале необходимо найти ответ о разрешимости поставленной задачи, путем расчета критерия:

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m x_{i,j,k} \leq \sum_{i=1}^p s_{i,k}, \quad \forall k = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Если данное условие не выполняется, то на данном шаге будет невозможно удовлетворить все заказы, и необходимо выбрать и удалить из задачи некоторые заказы до тех пор, пока условие (4) не будет выполнено. После выполнения условия (4) начинается поэтапное применение генетического алгоритма.

На первом этапе построим начальную популяцию из некоторого количества особей, распределив заказы по складам, используя методы динамического программирования:

- Отсортируем список заказов в произвольном порядке.
- Выбирая заказы по очереди, будем использовать методы динамического программирования для оптимального распределения выбранного заказа с учетом наличия товаров на складе, а также уже ранее распределенных заказов.
- Выполнив данное распределение для всех заказов, мы получим некоторое решение задачи распределения (особь).
- Повторим пункты 1–3 с различными начальными сортировками заказов, тем самым получая каждый раз новую особь для начальной популяции.

Очевидно, что решения, полученные при различном начальном порядке заказов, будут разными, и простое использование данного жадного алгоритма в большинстве случаев не будет давать решение, с достаточно низким значением критерия (1). Также очевидно, что если существует решение, которому соответствует меньшее значение критерия, то в нем хотя бы один заказ размещен с более низкой стоимостью, чем в полученном решении.

На втором этапе переберем все особи из начальной популяции и применим к каждой из них следующую мутацию:

- Выберем произвольный заказ из данного решения, который распределен способом, не обеспечиваемым минимальное значение критерия.
- Распределим выбранный заказ с минимально возможной стоимостью доставки, не учитывая при этом остальные заказы.
- Очевидно, что после такого распределения выбранного заказа для одного или нескольких складов будет нарушено условие (2). Выберем на данных складах те заказы, удаление которых приведет к выполнению неравенства (2).
- Выбирая удаленные на шаге 3 заказы по очереди, будем использовать методы динамического программирования для оптимального распределения выбранного заказа с учетом наличия товаров на складе, а также уже ранее распределенных заказов.

В результате выполнения второго этапа мы удвоим размер нашей популяции, добавив в нее по одному «решению с мутацией» для каждого изначального решения.

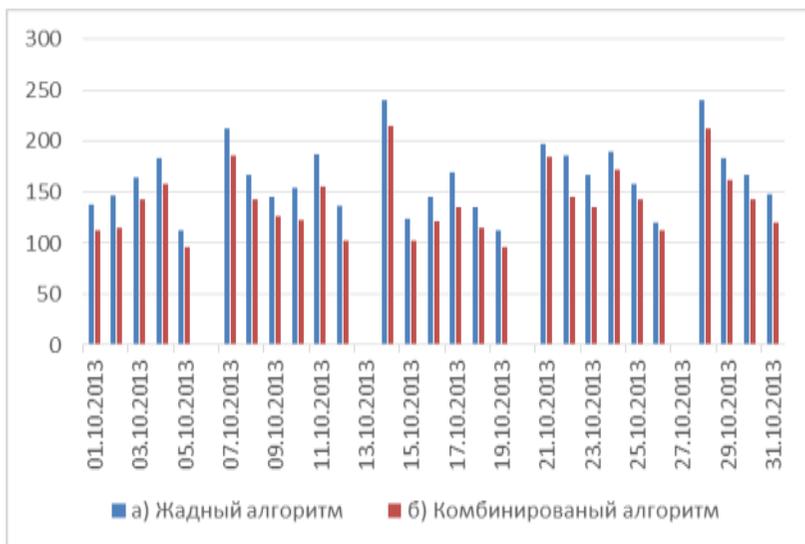
На третьем этапе рассчитаем значения критерия (3) для каждого полученного решения в популяции, и удалим из нее те, для которых этот критерий выше среднего для популяции. Снова перейдем ко второму этапу, тем самым получая механизм генерации следующих популяций.

Из описанного алгоритма видно, что каждая новая популяция будет содержать решения со значением критерия оптимизации не выше, чем в предыдущей популяции. Критериями остановки данного алгоритма могут быть:

- Достижение определенного количества итераций
- Получение решения, которое по каким-то заданным критериям можно считать достаточно близким к оптимальному.
- Достижения определенного временного лимита на решение поставленной задачи.

Результаты применения полученного алгоритма. Предложенный алгоритм решения задачи поиска оптимальной дистрибуции заказов был реализован на языке программирования Python. В качестве исходных данных были взяты реальные данные компании «СТВ». Компания производит удовлетворение примерно 200 заказов ежедневно с 80 географически распределенных складов. С целью скрыть реальные показатели работы компании все стоимо-

сти были умножены на некоторую случайно сгенерированную константу. Для оценки качества работы разработанного алгоритма было выполнено сравнение результатов работы жадного алгоритма, применяемого на данный момент в компании с результатами работы описанного комбинированного алгоритма на основе исторических данных на протяжении 30 дней. Результаты данного сравнения отображены ниже на рисунке.



Расходы на дистрибуцию товаров: *а* – с использованием жадного алгоритма; *б* – с использованием комбинированного алгоритма

Из приведенного на рисунке графика видно, что замена текущего жадного алгоритма на предложенный комбинированный даст существенное снижение затрат на доставку товаров и является экономически выгодной.

Связь с задачами пополнения запасов. Следует отметить, что сама необходимость решения описанной задачи может говорить о неоптимальной стратегии пополнения запасов на складах. Действительно, если бы каждый склад имел в наличии достаточно ресурсов для удовлетворения всех ближайших к нему заказов, то все заказы можно было бы удовлетворить с минимальной возможной стоимостью доставки. Тем не менее, существование высоких запасов товаров на складе означает повышенные расходы на хранение товара, а также слишком высокую суммарную стоимость инвентории.

Таким образом, задача пополнения запасов с поддержанием минимального страхового уровня в каком-то смысле может быть противоположна задаче оптимальной дистрибуции. Увеличение страховых запасов, а значит и стоимости хранения приводит к уменьшению стоимости доставки товаров конечным потребителям и наоборот.

Другим расширением задачи об оптимальной дистрибуции можно считать учет динамической информации о пополнении запасов. В некоторых случаях, зная что необходимые запасы будут пополнены в ближайшее время, может быть экономически более выгодно отложить удовлетворения заказа на некоторое время и потом его доставка по минимальной цене, чем удовлетворение заказа в текущий момент времени по более высокой цене доставки.

В результате особый интерес представляет разработка методов управления запасов и их дистрибуции, учитывающих одновременно и стоимость хранения и стоимость дистрибуции товаров.

Выводы. В работе сформулирована задача оптимальной дистрибуции товаров с нескольких складов. Для поставленной задачи предложен комбинированный алгоритм решения на базе методов динамического программирования и генетических алгоритмов. Предложенный алгоритм реализован в программном комплексе, и на базе результатов его работы проведено сравнение с методами, применяемыми на предприятии на данный момент, и дано экономическое обоснование реализации предложенного алгоритма для решения задачи дистрибуции на предприятии.

Список литературы: 1. Martello S., Toth P. Knapsack problems. Algorithms and Computer Implementations / Martello S., Toth P. – John Wiley & Sons, 1990. – 306 с. 2. Pisinger D. Algorithms for Knapsack Problems / Pisinger D. – Ph.D. thesis, 1995. – 200с. 3. Батищев Д. И., Неймарк Е. А., Старостин Н. В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации / Батищев Д. И., Неймарк Е. А., Старостин Н. В. – [Электронный ресурс]: <http://m.chorus-nnsu.ru/pages/e-library/aids/2007/15.pdf> 4. Авдеев А. А. Применение генетических алгоритмов к задачам оптимизации. / Авдеев А. А. // Технические науки – 2008. – № 2. – С. 110–111.

Надійшла до редколегії 30.10.2013

УДК 65.011.56

Применение генетических алгоритмов при расчете оптимального плана дистрибуции товаров / А. А. Никульченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 15–20. – Бібліогр.: 4 назв.

Пропонується використання комбінованого методу динамічного програмування і генетичних алгоритмів для знаходження оптимального плану дистрибуції товарів у багатоміноміклатурних системах з декількома точками поставки та обмеженнями на обсяги поставок. Виконана реалізація запропонованого алгоритму та проведено його випробування на реальних даних.

Ключові слова: генетичні алгоритми, динамічне програмування, задача дистрибуції товарів, багатокритеріальна задача упакування рюкзака.

Composed method of dynamic programming and genetic algorithms suggested to find the optimal plan of distribution of the goods in multinomenclature systems with multiple distribution points and restrictions on shipments. The implementation of the proposed algorithm is completed and tested on real data.

Keywords: genetic algorithms, dynamic programming, the problem of distribution of goods, multiple knapsack problem.

К. В. КРОТОВ, канд. техн. наук, доц. СевНТУ, Севастополь;
В. Е. ШИШКЕВИЧ, ст. преп. СевНТУ, Севастополь

МОДЕЛЬ МНОГОУРОВНЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ ОБРАБОТКИ ТРЕБОВАНИЙ КОМПЛЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ (ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГРУПП ПАРТИЙ)

В работе обосновывается модель многоуровневого программирования для формирования эффективного состава групп партий, расписаний выполнения операций с ними при обработке требований, входящих в комплекты разных типов, при наличии ограничений на длительность интервалов работы системы.

Ключевые слова: многоуровневое программирование, теория расписаний, партии требований, группы партий, комплекты требований.

Введение. В современных вычислительных системах возникает задача составления расписаний обработки данных конвейеризированными программами (выполнение которых реализуется в конвейерной системе, состоящей из нескольких (в общем случае L) обрабатывающих приборов, образующих последовательность). При этом результаты обработки данных конвейеризированными программами образуют комплекты (комплекты разных типов). Задачей на обработку являются данные, обрабатываемые в системе некоторой i -й конвейеризированной программой. Обозначим: i – идентификатор типа приложения, выполнение которого реализуется в конвейерной системе ($i = \overline{1, n}$), d_i – момент времени поступления в систему каждого i -го приложения для обработки соответствующих ему данных. Для всех программ моменты времени их загрузки в систему и моменты поступления данных на обработку $d_i = 0$. Реализация в многостадийной системе выполнения конвейеризированной программы предполагает осуществление вычислений на каждом сегменте конвейера в соответствии с определенной ее частью кода. Обозначим через l индекс обрабатывающего прибора, входящего в состав многостадийной системы (l -й сегмент вычислительной конвейерной системы), осуществляющего выполнение (l -й) части программы, выполняемой в системе. Каждым сегментом конвейерной системы выполняются вычисления, соответствующие назначенной для этого обрабатывающего прибора части программы, тогда введенному в теории расписаний понятию обрабатываемого требования соответствует выполняемая в вычислительной системе конвейеризированная программа. Дисциплина обслуживания выполняемых в системе программ предполагает прохождение данными, которые они обрабатывают, всех сегментов конвейера, при этом если l -й прибор приступил к вы-

полнению i -й программы (к обработке i -го требования), обработка не может быть прервана. Все обрабатывающие приборы конвейерной системы характеризуются равными и неизменными во времени значениями производительности их работы. Выполнение на каждом l -м приборе назначенной ему части i -го программы характеризуется параметром длительности обработки данных на этом приборе, однозначно соответствующей объему выполняемых вычислений при интерпретации программного кода, либо в терминах теории расписаний, длительности обработки i -го требования на l -м приборе. Особенно-стями постановки задачи, решение которой осуществляется в предлагаемой работе, являются: 1) необходимость выполнения программ каждого типа в конвейерной системе заданное число раз; 2) реализация обработки данных в многостадийной системе осуществляется в течение заданного количества равных интервалов времени; 3) результаты выполнения конвейеризированных программ (результаты обработки данных) образуют комплекты (комплекты разных типов), состав которых является заданным. Комплект требований представляет собой их совокупность, при этом количество требований каждого типа, входящих в комплект, является заданным. В дальнейшем, оперируя понятием комплект требований, подразумеваем совокупность результатов обработки данных, сформированных конвейеризированными программами i -х типов. Так как выполняемой в системе программе в теории расписаний соответствует обрабатываемое требование, то в рассмотрение введены следующие обозначения: N – множество типов требований ($N = \{1, 2, \dots, n\}$), n – количество типов требований), обработка которых реализуется в системе; N^i – множество, элемент n^i которого – это количество требований i -го типа, обработка которых должна быть выполнена в системе ($i = \overline{1, n}$), t^z – интервал времени, в течение которого может быть реализована обработка требований – интервал времени функционирования системы (количество интервалов обработки пакета заданий обозначено через Z , $z = \overline{1, Z}$), w_{ig} – количество требований i -го типа, которые должны входить в один комплект требований g -го типа (предполагается, что требования всех n типов входят в определенном количестве в состав каждого комплекта, обозначим общее количество типов комплектов через $g^{\text{ком}}$). Введена матрица (W), значения элементов w_{ig} которой равны числу требований i -го типа, которые должны входить в один комплект g -го типа.

Требования одного типа, поступающие на обработку в систему, группируются и образуют партию (партия – это совокупность требований одного типа, ее характеристиками являются: тип i требований в этой партии и количество требований в ней). Партия является фиксированной, если в нее входят все требования одного i -го типа. В тоже время партия может содержать не все n^i требований i -го типа, в этом случае в системе обрабатывается ни одна, а

несколько партий требований одного типа. Обработка партий требований при наличии временных ограничений (заданных интервалов t^z) должна быть направлена на осуществление операций в системе с максимальным количеством требований разных типов таким образом, чтобы из обработанных требований могло быть образовано максимальное количество комплектов заданного состава (максимальное количество комплектов $g^{\text{ком}}$ типов). Формирование партий требований i -х типов вместо фиксированных партий позволяет получить более эффективное решение (с точки зрения условия максимизации количества комплектов, сформированных из обработанных в течение заданных интервалов t^z). При этом должно быть определено как количество партий требований, так и их состав. В рассматриваемой постановке выполнение обработки партий требований i -х типов ($i = \overline{1, n}$) реализуется в течение заданных интервалов t^z (количество интервалов Z), тогда на основе полученного решения по количеству и составу партий требований должно быть сформировано Z групп партий. При этом состав групп партий для каждого временного интервала t^z определяется таким образом, чтобы обеспечить максимальную загрузку оборудования системы (уменьшить суммарный простой приборов системы при обработке соответствующей группы партий). В соответствии с полученным решением по составу групп партий требуется определить порядок обработки партий каждой из групп (последовательность запуска партий каждой из групп на обработку на каждом приборе системы) – расписания обработки партий в группах. Формирование расписаний обработки партий осуществляется при условии минимизации простоев приборов при обработке текущего количества партий группы.

В выполненной постановке задачи введены ограничения на длительность обработки групп партий (на длительность реализации расписаний), тогда не все сформированные партии могут быть распределены по группам, не вошедшие в группы партии являются не обработанными. Комплекты требований разных типов могут быть сформированы только из требований, входящих в партии, включенные в соответствующие группы (партий, которые будут обработаны в соответствии с построенными расписаниями при учете интервалов t^z). В то же время количество обработанных в течение интервалов t^z партий каждой из групп зависит от количества и состава сформированных партий (состав групп партий и количество сформированных комплектов требований являются зависящими от количества и состава партий).

Входными данными для системы построения расписаний групповой обработки партий при формировании комплектов заданных типов являются: типы конвейеризированных программ, выполняемых в системе (соответственно, множество N типов обрабатываемых требований); число раз, кото-

рое должно быть выполнена каждая программа в системе (множество N^i); равные значение интервалов времени t^z функционирования системы при обработке требований; количество Z интервалов времени функционирования системы, в течение которых реализуется обработка требований; матрица (W), элемент w_{ig} – количество требований i -го типа, которое входит в один формируемый комплект g -го типа ($i = \overline{1, n}$; $g = \overline{1, g^{\text{ком}}}$). Формируемыми выходными решениями являются: эффективное количество и состав партий требований i -х типов ($i \in N$), определяемые в соответствии с условием максимизации количества формируемых из обработанных требований комплектов; эффективные составы групп партий, обрабатываемых системой в течение заданных интервалов t^z , определяемые в соответствии с условием минимизации суммарных простоев приборов системы в течение интервалов t^z ; эффективные расписания обработки партий требований каждой группы (вид последовательностей обработки партий каждой группы на приборах системы). Формируемые решения по количеству, составу партий и групп партий, порядку обработки на приборах системы партий групп (с формированием комплектов из результатов обработки) могут быть названы комплексными расписаниями групповой обработки партий с формированием комплектов заданных типов. Рассматриваемая задача построения комплексных расписаний групповой обработки партий при наличии ограничений на длительность интервалов функционирования системы может быть решена как задача теории иерархических игр [1,2].

Использование современных методов решения задачи формирования расписаний обработки партий требований различных типов позволяет определять порядок обработки фиксированных партий (партий, в которые включены все требования одного типа), либо определять эффективное количество, состав и порядок обработки партий на ограниченном количестве приборов (на одном приборе) [3]. Постановка задачи формирования комплексных расписаний групповой обработки партий в общем виде предполагает задание: произвольного количества приборов, ограничений на время функционирования системы при обработке требований партий. Это обуславливает необходимость перехода к формированию эффективного количества и составов партий требований, к формированию групп партий, обрабатываемых в течение заданных интервалов времени t^z , и расписаний обработки партий в системе.

Постановка цели и задач научного исследования. Цель работы состоит в совершенствовании методов построения расписаний групповой обработки партий требований в конвейерных системах при формировании из результатов обработки комплектов заданных составов и наличии ограничений. Совершенствование методов построения расписаний групповой обработки партий в течение заданных интервалов времени связано с применением тео-

ретико-игрового подхода в теории расписаний. Это позволит реализовать определение эффективных составов партий, групп партий и порядков обработки партий на приборах системы. Для достижения поставленной цели в статье решается задача, связанная с построением модели определения эффективных комплексных расписаний групповой обработки партий при формировании комплектов и наличии ограничений на длительность выполнения операций с группами как модели иерархической игры.

Основное содержание работы. В соответствии с постановкой задачи построения комплексных расписаний групповой обработки партий при формировании комплектов заданных составов и наличии ограничений на интервалы функционирования системы решение должно быть определено в иерархической системе, уровни которой выполняют следующие функции: на первом уровне определяется количество и состав партий требований соответствующих типов, на втором уровне определяется состав групп партий, обрабатываемых в течение заданных интервалов t^z , на третьем уровне формируется порядок обработки партий каждой из групп в течение интервалов t^z . Поскольку сформированные на первом уровне партии требований на втором уровне распределяются по группам, для которых на третьем уровне определяется порядок обработки партий, тогда построение комплектов может быть выполнено только из требований партий, входящих в соответствующие группы (из обрабатываемых требований). Тогда на первом уровне системы также реализуется построение решения по составу комплектов из требований обрабатываемых партий, т.е. осуществляется определение решений двух типов: решения по количеству и составу партий требований; решения по составу комплектов, формируемых из обрабатываемых партий.

Решаемая задача является задачей с полной информацией, т.е. все параметры, характеризующие обрабатываемые требования (типы требований, количество требований каждого типа, составы формируемых комплектов требований, длительности обработки требований различных типов на приборах, длительности переналадки приборов, длительности первоначальной наладки приборов на обработку требований и т.д.) и функционирующую систему (количество обрабатываемых приборов, длительность интервала времени t^z функционирования системы при обработке партий, количество интервалов времени Z функционирования системы при обработке партий и т.д.) являются задаваемыми. Для решения сформулированной задачи в рассмотрение введены следующие обозначения. Через m_i обозначим количество партий требований i -го типа, формируемых на первом уровне принятия решений, при $i = \overline{1, n}$ элементы m_i образуют вектор (M) . В рассмотрение вводится матрица (A) , элемент a_{iu} которой – это количество требований i -го типа в u -й партии ($u \leq m_i$), размерность матрицы $(A) - n \times u^{\max}$, где $u^{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} (m_i)$. Если

$m_i \leq u^{\max}$, то $a_{iu} = 0$ при $u = \overline{m_i + 1, u^{\max}}$. Матрица (A) – это матрица составов партий требований различных (i -х) типов, для которой индекс столбца u – идентификатор соответствующей партии. Решение, формируемое на первом уровне системы (количество и состав партии требований) имеет вид: $[(M), (A)]$. Через N^z ($z = \overline{1, Z}$) обозначим группы партий, обрабатываемые в течение установленных интервалов t^z , расписание обработки партий z -й группы обозначим как π^z . Расписание обработки партий π^z – это совокупность последовательностей π^l запуска партий на обработку на каждом l -м приборе ($l = \overline{1, L}$), оно имеет вид: $\pi^z = \{\pi^1, \pi^2, \pi^3, \dots, \pi^L\}^z$.

В соответствии с функциями уровней системы между ними выполняется обмен информацией следующего вида: 1) на вход первого уровня подаются множества N , N^i и матрица (W) ; с выхода уровня на вход второго уровня передаются составы партий требований i -х типов – решение в виде $[(M), (A)]$; 2) на вход второго уровня – состав партий требований; с выхода уровня – сформированные с учетом ограничения на интервал времени работы системы группы партий требований N^z ($z = \overline{1, Z}$); 3) на вход третьего уровня – совокупность групп партий требований N^z ($z = \overline{1, Z}$); с выхода уровня – сформированные порядки обработки партий требований групп N^z для заданных интервалов времени (расписания π^z). При распределении совокупности партий требований i -х типов (представленной в виде решения $[(M), (A)]$) по группам партий N^z ($z = \overline{1, Z}$) состав партий не изменяется (значения m_i и a_{iu} , поступившие с верхнего уровня, изменены быть не могут). После того, как для текущего состава партий (для текущего решения на первом уровне) на втором уровне сформированы эффективные составы групп партий (с учетом ограничений на длительность функционирования системы при обработке партий), полученное на этом уровне решение передается на первый уровень для определения эффективного состава комплектов разных типов, в которые входят требования из партий, обрабатываемых в составе групп N^z ($z = \overline{1, Z}$).

Партии требований некоторого i -го типа в количестве m_i могут входить в различные группы партий N^z . Через m_i^z обозначим количество партий требований i -го типа в группе партий N^z (если партии требований i -го типа не входят в N^z , то $m_i^z = 0$), через $(A)_i^z$ обозначим вектор количества требований i -го типа в m_i^z партиях в группе. Партии требований i -го типа, входящие в группу партий N^z , определены с использованием набора параметров

вида: $[i, m_i^z, (A)_i^z]$. Обобщенная форма решения по составу группы N^z имеет вид: $N^z = \{[i, m_i, (A)_i]_k \mid k = \overline{1, k_z}\}^z$, где k_z – количество типов требований, партии которых входят в N^z . Решение, формируемое на втором уровне системы – совокупность групп партий, имеет вид: $\{N^z \mid (z = \overline{1, Z})\}$. Для формализации вида последовательностей π^l расписания π^z в рассмотрении введена матрица порядка обработки партий в системе $(P)^z$. Элемент $p_{ij}^z = 1$, если партия требований i -го типа занимает в последовательности π^l j -ю позицию, $p_{ij}^z = 0$ в противном случае, размер матрицы $n^z \times n_p^z$, где n^z – число типов требований в партиях в группе N^z , n_p^z – число партий в последовательностях π^l для группы N^z . Порядок обработки партий группы на всех приборах одинаков, поэтому достаточно определения одной матрицы порядка $(P)^z$. В рассмотрение введена матрица $(R)^z$ – матрица количества требований i -го типа в партиях, занимающих в последовательности π^l j -е позиции (r_{ij}^z – количество требований i -го типа в партии, занимающей j -ю позицию в π^l , размер матрицы $n^z \times n_p^z$), решение, формируемое на нижнем уровне системы имеет вид: $\{[(P)^z, (R)^z] \mid z = \overline{1, Z}\}$.

Сформированное на втором уровне решение в виде $\{N^{z*} \mid (z = \overline{1, Z})\}$ (эффективное решение на втором уровне для текущего состава партий) передается на первый уровень с целью определения состава комплектов. Для формирования решения по составу комплектов требований на первом уровне системы в рассмотрение введена матрица $(N^{\text{КОМ}})$, значения элементов g -го столбца которой соответствуют количеству требований i -х типов, входящих в комплекты g -го типа (элемент $n_{ig}^{\text{КОМ}}$ соответствует количеству требований i -го типа, которые входят в состав комплектов g -го типа). Таким образом, решение по составу комплектов требований в виде матрицы $N^{\text{КОМ}}$ формируется на основе решения по составу групп партий $\{N^{z*} \mid (z = \overline{1, Z})\}$, тогда количество комплектов g -го типа, в которые могут входить требования i -го типа определено выражением: $n_{ig}^{\text{КОМ}} / w_{ig}$. Обозначим через $N_g^{\text{КОМ}}$ количество комплектов g -го типа, которые могут быть сформированы из требований всех i -х типов; оно будет определено выражением вида:

$$N_g^{\text{КОМ}} = \min_{1 \leq i \leq n} (n_{ig}^{\text{КОМ}} / w_{ig}) \text{ при } g = \overline{1, g^{\text{КОМ}}} \quad (1)$$

Для элементов n_{ig}^{KOM} матрицы (N^{KOM}) и элементов $(a_h)_i^z$ ($h = \overline{1, m_i^z}$) векторов $(A)_i^z$ в решениях N^{z*} (при $z = \overline{1, Z}$) выполняется условие следующего

$$\text{вида: } \sum_{z=1}^Z \sum_{h=1}^{m_i^z} (a_h)_i^z = \sum_{g=1}^{g^{\text{KOM}}} n_{ig}^{\text{KOM}}.$$

Вычисляемые с использованием выражения $n_{ig}^{\text{KOM}} / w_{ig}$ и выражения (1) значения должны удовлетворять условию целочисленности. Таким образом, полученные с использованием выражения $n_{ig}^{\text{KOM}} / w_{ig}$ значения ($i = \overline{1, n}$) образуют вектор числа комплектов g -го типа, в которые могут входить требования i -х типов. Количество комплектов, образуемых из требований i -х типов, определяется выражением (1).

В общем виде модель иерархической игры в введенных обозначениях при наличии ограничений имеет вид [1,2]:

1) первый уровень:

$$f_1(\{N^{z*} | z = \overline{1, Z}\}) \rightarrow \min(\max), \quad [(M), (A)] \in A, \quad (2)$$

2) второй уровень:

$$f_2(\{[(P)^z, (R)^z] | z = \overline{1, Z}\}) \rightarrow \min(\max), \quad N^z \in B, \quad (3)$$

3) третий уровень:

$$f_3(\{N^z, \{[(P)^z, (R)^z]\} | z = \overline{1, Z}\}) \rightarrow \min(\max), \quad [(P)^z, (R)^z] \in \Gamma. \quad (4)$$

В соответствии с моделью (2)–(4) эффективность групп партий на втором уровне системы оценивается на основе эффективных расписаний, эффективный состав группы партий требований должен обеспечивать расписание обработки партий, при котором неэффективное использование временных ресурсов приборов системы будет минимальным. Эффективность составов партий (первый уровень) оценивается на основе эффективных составов групп партий, эффективный состав партий должен обеспечивать такой состав групп партий, при котором общее количество сформированных из обработанных требований комплектов разных типов будет максимальным.

Для определения вида модели многоуровневого программирования построения расписаний обработки требований, входящих в состав комплектов, при наличии ограничений на длительность временных интервалов введены следующие обозначения: t_i^l – время обработки требований i -го типа на l -м приборе ($l = \overline{1, L}$); t_{ik}^l – время переналадки l -го прибора с обработки требований i -го типа на обработку требований k -го типа; t_{ii}^l – время первоначальной наладки l -го прибора на обработку требований i -го типа; t_{ji}^{nl} – время начала обработки партии требований i -го типа, занимающей j -ю позицию в π^l на l -м

приборе; $(t_{ji}^{nl})^z$ – матрица моментов времени начала обработки партий требований i -х типов, занимающих в π^l j -е позиции (для группы партий N^z); $(t_{jq}^{ol})^z$ – матрица моментов времени начала обработки q -х требований партии, занимающей в π^l j -ю позицию (q – порядковый номер требования в партии в j -й позиции в π^l , $(q = \overline{1, n_j^z}, n_j^z = \sum_{h=1}^{n^z} r_{hj}^z$, где n_j^z – количество требований в партии, входящей в группу N^z , занимающей j -ю позицию в π^l). С использованием элементов матриц $(P)^z$ и $(t_{jq}^{ol})^z$ элементы матрицы $(t_{ji}^{nl})^z$ определяются следующим образом: $[t_{ji}^{nl}]^z = p_{ij}^z \cdot [t_{jl}^{ol}]^z$, где $i = \overline{1, n^z}$, $j = \overline{1, n_p^z}$, $[t_{jl}^{ol}]^z$ – момент времени начала обработки первого требования в партии, занимающей j -ю позицию в π^l . В рассмотрение введена матрица переналадок (t_{ik}^l) , элементы t_{ik}^l которой соответствуют длительностям переналадки приборов с обработки требований i -го типа на обработку требований k -го типа, элементы t_{ii}^l – время первоначальной наладки приборов на обработку требований i -го типа. Выполним дальнейшие рассуждения для одной из групп N^z (опуская индекс z).

Для первого прибора выражения для t_{jq}^{01} формируются следующим образом: 1) если t_{11}^{01} – время начала обработки первого требования ($q=1$) в партии, занимающей первую позицию в последовательностях π^1 , t_{ii}^{n1} – время начала обработки партии требований i -го типа, занимающей в π^1 первую позицию, тогда $t_{11}^{01} = t_{ii}^{n1} = t_{ii}^1$, 2) выражение t определяет интервал первоначальной наладки первого прибора на обработку требований i -го типа; $(q-1) \sum_{h=1}^n t_h^1 \cdot p_{h1}$ – время обработки $(q-1)$ -го требования в этой партии, (t^1) – вектор длительностей обработки на первом приборе требований разных типов, входящих в группу партий N^z , тогда значение t_{1q}^{01} начала обработки любого требования первой партии (в π^1), занимающего в ней q -ю позицию $\left(1 \leq q \leq n_1, n_1 = \sum_{h=1}^n r_{h1} \right)$, определяется выражением вида:

$$t_{1q}^{01} = \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + (q-1) \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h1}; \quad (5)$$

3) если $t_{i_2 i_1}^{1неп}$ – время переналадки первого прибора с обработки требований i -го типа (первая позиция партии в π^1) на обработку требований другого

типа (вторая позиция партии в π^1), а t_{21}^{01} – время начала обработки первого требования во второй партии (t_{2i}^{n1} – начало обработки этой партии требований i -го типа в π^1 ($t_{2i}^{n1} = t_{21}^{01}$)), тогда с учетом (5) значения t_{21}^{01} (t_{2i}^{n1}) определяются выражением вида:

$$t_{2i}^{n1} = t_{21}^{01} = \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h1} + t_{i i_2}^{1nep}, \quad (6)$$

где значение $t_{i i_2}^{1nep}$ определяется следующим образом:

$$t_{i i_2}^{1nep} = t_{i i_r}^1, \text{ где } \begin{cases} i_r = i \mid p_{i1} = 1, i = \overline{1, n} \\ i_r = j \mid p_{j2} = 1, j = \overline{1, n} \end{cases}.$$

Выражение $\sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h1} + t_{i i_2}^{1nep}$ позволяет определить время начала обработки второй в π^1 партии, выражение $(q-1) \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h2}$ – длительность обработки предшествующих q -му требованиям в этой партии, тогда время начала обработки q -го требования i -го типа в партии, занимающей вторую позицию в π^1 , определяется следующим образом:

$$t_{2q}^{01} = \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h1} + t_{i i_2}^{1nep} + (q-1) \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h2}, q = \overline{1, r_{i2}}. \quad (7)$$

По аналогии с (6), (7) сформированы выражения для вычисления моментов времени начала обработки третьей, четвертой партий и требований в них:

$$\begin{aligned} t_{3i}^{n1} &= \sum_{p=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h1} + t_{i i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h2} + t_{i i_3}^{1nep}; \\ t_{3q}^{01} &= \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h1} + t_{i i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h2} + t_{i i_3}^{1nep} + (q-1) \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h3}; \\ t_{4i}^{n1} &= \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h1} + t_{i i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h2} + t_{i i_3}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h3} + t_{i i_4}^{1nep}; \\ t_{4q}^{01} &= \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h1} + t_{i i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h2} + t_{i i_3}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{h3} + t_{i i_4}^{1nep} + \\ & (q-1) \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h4} \end{aligned}$$

Время начала обработки партии требований i -го типа, занимающей j -ю позицию в π^1 определяется выражением вида:

$$t_{ji}^{n1} = \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{f=1}^{j-1} \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{hf} + \sum_{h=1}^{j-1} t_{i_{i_{h+1}}}^{1\text{непр}}, \text{ время начала обработки } q\text{-го требования}$$

в ней: $t_{jq}^{01} = \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{f=1}^{j-1} \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot r_{hf} + \sum_{h=1}^{j-1} t_{i_{i_{h+1}}}^{1\text{непр}} + (q-1) \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{hj}$. Выражение для t_{jq}^{0l} ($q = \overline{1, n_j}$) сформируем в соответствии с порядком обработки партий (рис. 1, при $l \neq 1$). Для $l=2$ и $j=1$ имеем:

$$t_{11}^{02} = t_{1i}^{n2} = \max \left\{ \sum_{h=1}^{n^z} t_{hh}^2 \cdot p_{h1}; t_{11}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h1} \right\},$$

$$t_{12}^{02} = \max \left\{ t_{11}^{02} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^2 \cdot p_{h1}; t_{12}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h1} \right\}, \dots$$

$$t_{1n_1}^{02} = \max \left\{ t_{1, n_1-1}^{02} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^2 \cdot p_{h1}; t_{1n_1}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h1} \right\},$$

$n_1 = \sum_{i=1}^{n^z} r_{i1}$ – количество требований в первой партии. Выражения для

определения t_{2q}^{02} ($q = \overline{1, n_2}, n_2 = \sum_{h=1}^{n^z} r_{h2}$) (вторая партия в π^2) имеют вид:

$$t_{21}^{02} = t_{2i}^{n2} = \max \left\{ t_{1n_1}^{02} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^2 \cdot p_{h1} + t_{i_{i_2}}^{2\text{непр}}; t_{21}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h,2} \right\};$$

$$t_{22}^{02} = \max \left\{ t_{21}^{02} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^2 \cdot p_{h2}; t_{22}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h2} \right\};$$

$$t_{2n_2}^{02} = \max \left\{ t_{2, n_2-1}^{02} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^2 \cdot p_{h2}; t_{2, n_2}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h2} \right\}.$$

Выражения для t_{3i}^{n2} и t_{3q}^{02} имеют вид:

$$t_{31}^{02} = t_{3i}^{n2} = \max \left\{ t_{2, n_2}^{02} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^2 \cdot p_{h2} + t_{i_2 i_3}^{2\text{непр}}; t_{31}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h3} \right\};$$

$$t_{3q}^{02} = \max \left\{ t_{3,q-1}^{02} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^2 \cdot p_{h3}; t_{3q}^{01} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^1 \cdot p_{h3} \right\}, \text{ где } q = \overline{2, n_3}, n_3 = \sum_{h=1}^n r_{h3}.$$

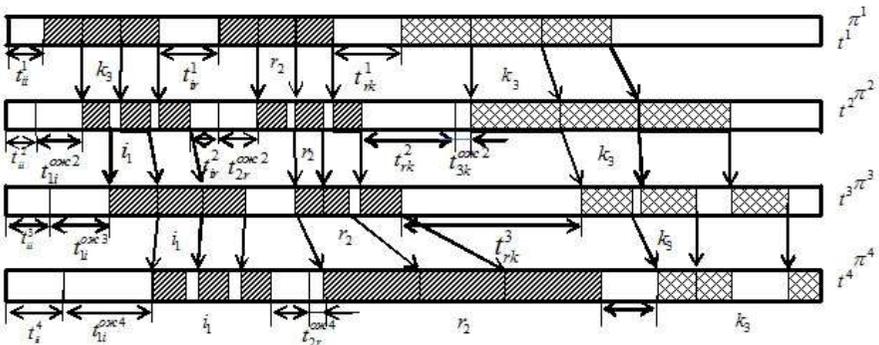
На их основе получены обобщенные выражения для определения t_{jq}^{0l} ($q = \overline{1, n_j}, l \neq 1$) в виде:

$$t_{11}^{0l} = t_{11}^{nl} = \max \left\{ \sum_{h=1}^{n^z} t_h^l \cdot p_{h1}; t_{11}^{0l-1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^{l-1} \cdot p_{h1} \right\};$$

$$t_{j1}^{0l} = t_{ji}^{nl} = \max \left\{ t_{j-1, n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^l \cdot p_{h, j-1} + t_{i, j-1}^{l, nep}; t_{j1}^{0l-1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^{l-1} \cdot p_{hj} \right\};$$

$$t_{jq}^{0l} = \max \left\{ t_{jq-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^l \cdot p_{hj}; t_{jq}^{0l-1} + \sum_{h=1}^{n^z} t_h^{l-1} \cdot p_{hj} \right\}.$$

Метод построения расписания обработки партий на третьем уровне системы [4] предполагает добавление текущей рассматриваемой партии в конец последовательностей π^l и определение эффективного местоположения партии в последовательностях. Тогда значение критерия оптимизации определяет простой приборов при обработке текущего количества партий, находящихся в последовательности (но не всех партий из группы N^z). Формирование критерия оптимизации на третьем уровне выполнено в соответствии с заданными видами последовательностей обработки партий (см. рисунок).



Заданные виды последовательностей обработки партий, используемые при формировании критерия оптимизации на третьем уровне планирования

Анализ последовательностей позволил определить особенности идентификации интервалов времени простоя приборов:

1) малые длительности обработки требований i -го, r -го и k -го типов на приборе $l=2$ при малых длительностях его переналадки обуславливают ожидание им готовности партий к обработке и ожидание прибором требований при их обработке внутри партии, интервалы ожидания приборами требований при их обработке внутри партии являются одинаковыми, тогда порядок обработки партий будет определять: а) длительность переналадок приборов с обработки требований одного типа на обработку требований другого типа; б) длительность простоя приборов в ожидании начала обработки партий и равные длительности интервалов простоя приборов при обработке требований этих партий;

2) при значительных значениях t'_{ik} (рис. 1: приборы $l=3, l=4$, последовательности π^3 и π^4 , интервалы $t'_{ir}, t'_{rk}, t'_{ik}$) наблюдаются различные интервалы времени простоя приборов (третьего и четвертого) при обработке требований внутри партий, тогда различный порядок обработки партий определяет не только различные по величине интервалы переналадки и ожидания приборами начала обработки партий, но и различные по длительности интервалы простоя приборов при обработке требований внутри партий.

В этом случае критерий эффективности расписания обработки партий на третьем уровне должен учитывать: а) время простоя приборов в ожидании начала обработки требований партий (с учетом интервалов наладки, переналадки и последующего ожидания); б) время простоя приборов в ожидании готовности требований при их обработке внутри партий.

Простой l -го прибора в ожидании обработки первой в $\overline{\pi^l}$ партии равен значению t_{11}^{ol} , суммарное время простоя всех приборов ($l = \overline{1, L}$) в ожидании начала обработки партий в последовательностях π^l определяется выражением вида $\sum_{l=1}^L t_{11}^{ol}$. В интервал простоя l -го прибора в ожидании начала обработки партии после окончания обработки предыдущей партии входят: интервал переналадки прибора с обработки требований одного на обработку требований другого типа ($t_{i_{j-1}j}^{lпер}$), возможный ненулевой интервал ожидания прибором начала обработки партии после окончания переналадки $t_{j,i}^{ожl}$ (рисунок 1, где $t_{j,i}^{ожl}$ – время ожидания l -м прибором начала обработки партии i -х требований). Время простоя прибора соответствует сумме $t_{i_{j-1}j}^{lпер} + t_{j,i}^{ожl}$, его значение определяется выражением $t_{j1}^{ol} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{ol} + \sum_{h=1}^{n_j^z} t_h^l \cdot p_{h,j-1} \right]$, где $j > 1$, $n_{j-1} = \sum_{h=1}^{n_j^z} r_{h,j-1}$ – число требований в предшествующей в π^l партии. Суммарный простой l -го прибора в ожидании начала обработки j -х партий ($j = \overline{2, n_p^z}$, где n_p^z – общее

число партий в последовательностях π^l) определяется следующим образом:

$$\sum_{j=2}^{n_p^l} \left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1, n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n_h^l} t_h^l \cdot p_{h, j-1} \right] \right].$$

В этом случае суммарный простой всех L приборов в ожидании начала обработки партий на них определяется:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^{n_p^l} \left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1, n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n_h^l} t_h^l \cdot p_{h, j-1} \right] \right] \quad (8)$$

Простой l -го прибора в ожидании готовности к обработке требования, занимающего q -ю позицию в j -й партии в π^l , определяется выражением вида: $t_{jq}^{0l} - \left[t_{j, q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n_h^l} t_h^l \cdot p_{hj} \right]$. Это выражение соответствует интервалу между

двумя требованиями (в q -й и $(q-1)$ -й позициях) в j -й партии в π^l . Суммарный простой l -го прибора в ожидании готовности к обработке требований j -й партии в π^l вычисляется: $\sum_{q=2}^{n_j^l} \left[t_{jq}^{0l} - \left[t_{j, q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n_h^l} t_h^l \cdot p_{hj} \right] \right]$, где q – номер позиции

требования в j -й партии, n_j^z - число требований в j -й партии, $n_j^z = \sum_{h=1}^{n_h^z} r_{hj}$, тогда

общий простой l -го прибора при ожидании готовности к обработке требований внутри партий определяется выражением вида:

$$\sum_{j=1}^{n_p^l} \sum_{q=2}^{n_j^l} \left[t_{jq}^{0l} - \left[t_{j, q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n_h^l} t_h^l \cdot p_{hj} \right] \right],$$

а суммарный простой всех приборов ($l = \overline{1, L}$) в ожидании готовности требований внутри партий вычисляется по выражению:

$$\sum_{l=2}^L \sum_{j=1}^{n_p^l} \sum_{q=2}^{n_j^l} \left[t_{jq}^{0l} - \left[t_{j, q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n_h^l} t_h^l \cdot p_{hj} \right] \right]. \quad (9)$$

Критерий эффективности определения последовательности обработки партий сформирован на основе формул (8), (9) с использованием выражения

$\sum_{l=1}^L t_{11}^{0l}$ и введением индекса z , позволяющего идентифицировать качество рас-

писания для конкретной группы партий N^z , в виде:

$$\sum_{l=2}^L (t_{11}^{0l})^z + \sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^{n_p^l} \left[(t_{j1}^{0l})^z - \left[(t_{j-1, n_{j-1}}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n_h^l} (t_h^l)^z \cdot p_{h, j-1} \right] \right] + \sum_{l=2}^L \sum_{j=1}^{n_p^l} \sum_{q=2}^{n_j^l} \left[(t_{jq}^{0l})^z - \left[(t_{j, q-1}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n_h^l} (t_h^l)^z \cdot p_{hj} \right] \right] \quad (10)$$

Критерий на втором уровне принятия решений (при определении состава групп партий N^z) характеризует общую эффективность использования ресурса времени приборов системы при реализации обработки каждой группы партий N^z (критерий соответствует суммарному времени простоя приборов системы при обработке партий рассматриваемой группы). Так как на втором уровне определяется эффективный состав одной из групп партий, то формируемый критерий должен характеризовать эффективность состава этой группы. Суммарное время простоя приборов при обработке партий группы N^z определяется: 1) суммой длительностей интервалов наладки приборов и возможного простоя приборов в ожидании начала обработки первого требования в первой партии в $\pi^l (t_{li}^l + t_{li}^{okl})$ при $l = \overline{1, L}$, вычисляемой для всех L приборов выражением вида $\sum_{l=1}^L t_{11}^{0l}$; 2) суммой длительностей: переналадки приборов с обработки требований одного на обработку требований другого типов, возможного простоя приборов в ожидании обработки первого в следующей в π^l партии, определяемой для L приборов выражением (8); 3) суммой длительностей интервалов времени простоя приборов в ожидании готовности требований при обработке партии внутри группы, определяемой для L приборов выражением (9); 4) суммой длительностей интервалов простоя L приборов после окончания обработки партий группы N^z в количестве n_p^z (т.е. сумма интервалов простоя приборов на стадии «освобождения» конвейера). Для определения последней из названных компонент суммарного времени простоя использованы обозначения: n_p^z – количество партий, входящих в группу N^z (индекс последней партии в группе); $n_{n_p}^z$ – количество требований, входящих в последнюю в N^z партию. Тогда $(t_{n_p^z, n_{n_p}^z}^{0l})^z$ – момент времени начала обработки последнего требования в партии с индексом n_p^z (последней партии в группе N^z), а время окончания обработки этой партии на l -м приборе определяется выражением вида: $(t_{n_p^z, n_{n_p}^z}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n_p^z} (t_h^l)^z \cdot p_{h, n_p^z}^z$. В этом случае время простоя l -го прибора после окончания обработки партий группы N^z определяется выражением: $(t^z - [(t_{n_p^z, n_{n_p}^z}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n_p^z} (t_h^l)^z \cdot p_{h, n_p^z}^z])$, а суммарный простой всех приборов системы после окончания обработки группы партий N^z вычисляется с использованием выражения вида:

$$\sum_{l=1}^L \{t^z - [(t_{n_p^0, n_p^0}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^z} (t_h^l)^z \cdot p_{h, n_p^z}^z]\}. \quad (11)$$

С учетом выражений (14)–(17) критерий эффективности принятия решений по составу групп партий на втором уровне иерархии системы примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{l=2}^L (t_{11}^{0l})^z + \sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^{n_p^z} \left[(t_{jl}^{0l})^z - \left[(t_{j-1, n_{j-1}}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^z} (t_h^l)^z \cdot p_{h, j-1}^z \right] \right] + \\ & \sum_{l=2}^L \sum_{j=1}^{n_p^z} \sum_{q=2}^{n_p^z} \left[(t_{jq}^{0l})^z - \left[(t_{j, q-1}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^z} (t_h^l)^z \cdot p_{hj}^z \right] \right] + \left[\sum_{l=1}^L \{t^z - [(t_{n_p^0, n_p^0}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^z} (t_h^l)^z \cdot p_{h, n_p^z}^z]\} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Эффективное решение по составу групп партий, сформированное в соответствии с критерием (12) на втором уровне для текущего состава партий (решения на первом уровне), должно быть передано на первый уровень для формирования комплектов из требований, которые будут обработаны в составе групп. При формировании составов комплектов заданных типов используется матрица ($N^{\text{КОМ}}$), элемент $n_{ig}^{\text{КОМ}}$ которой соответствует количеству требований i -го типа входящих в состав комплектов g -го типа. Количество комплектов g -го типа, в которые могут входить $n_{ig}^{\text{КОМ}}$ требований i -го типа, определяется выражением вида: $n_{ig}^{\text{КОМ}} / w_{ig}$, а число комплектов g -го типа, которые могут быть сформированы из требований всех i -х типов определено выражением (1). Обработанные требования партий групп N^z должны быть распределены по комплектам разных типов в соответствии с некоторым критерием, для обоснования которого выполним следующие рассуждения. Каждое из требований может входить только в состав комплекта одного типа. Исключение требования из комплектов одного типа должно обуславливать добавление этого требования в комплекты другого типа (т.е. любое из обработанных требований должно быть включено в состав комплектов одного из типов). Таким образом, состав комплектов одного типа является зависящим от состава комплектов другого типа, решения по составу комплектов разных типов являются взаимозависимыми, значение критерия эффективности решения по составу комплектов одного типа является зависящим от решения по составу комплектов другого типа. В рассмотрение вводится обозначение критерия эффективности составов комплектов g -го типа, значение которого является непосредственно зависящим от составов комплектов этого типа и опосредовано (в силу выполненных рассуждений) от составов комплектов других типов: $f_1^g(N_1^{\text{КОМ}}, N_2^{\text{КОМ}}, \dots, N_g^{\text{КОМ}}, \dots, N_{g^{\text{КОМ}}}^{\text{КОМ}})$, где $N_g^{\text{КОМ}}$ – решение по составу комплектов g -го типа (количество комплектов g -го типа). Процедуру форми-

рования эффективных составов комплектов g -х типов ($g = 1, \overline{g^{\text{КОМ}}}$) можно рассматривать как неантагонистическую игру $g^{\text{КОМ}}$ лиц, где каждый g -й игрок формирует составы комплектов соответствующего типа, при этом его решение по составу комплектов является зависящим от решений других игроков (при определении эффективных решений должны исследоваться $g^{\text{КОМ}}$ критериев в неантагонистической игре).

Эффективными в рассматриваемой постановке могут считаться такие составы комплектов заданных типов, для которых количество требований, обработанных в группах партий и вошедших в составы комплектов, буде максимальным. Либо в альтернативной постановке: количество требований, обработанных в составе групп партий, и не вошедших в состав комплектов должно быть минимизировано. Значение критерия эффективности f_1^g определяется для текущего решения – состава комплектов, которому соответствует сформированная в ходе поиска решения матрица ($N^{\text{КОМ}}$). Для сформированной матрицы ($N^{\text{КОМ}}$) – текущего решения, количество комплектов g -го типа, в которые могут войти обработанные требования i -го типа определяется выражением $n_{ig}^{\text{КОМ}} / w_{ig}$. Количество формируемых комплектов g -го типа, обозначенное как $N_g^{\text{КОМ}}$, определяется выражением (1).

Тогда количество требований i -го типа, которые не вошли в состав формируемых $N_g^{\text{КОМ}}$ комплектов g -го типа будет определено выражением вида: $(n_{ig}^{\text{КОМ}} / w_{ig} - N_g^{\text{КОМ}}) \cdot w_{ig}$, либо в модифицированном виде: $n_{ig}^{\text{КОМ}} - N_g^{\text{КОМ}} \cdot w_{ig}$. На основе полученного выражения, позволяющего определить количество требований i -го типа, не вошедших в $N_g^{\text{КОМ}}$ комплектов g -го типа, сформирован следующий вид критерия эффективности поиска решения по определению состава комплектов требований этого g -го типа f_1^g (критерия эффективности принятия решения g -м игроком в неантагонистической игре $g^{\text{КОМ}}$ лиц):

$$f_1^g = \sum_{i=1}^n (n_{ig}^{\text{КОМ}} - N_g^{\text{КОМ}} \cdot w_{ig}). \quad (13)$$

Поиск ситуации равновесия ($N_1^{\text{КОМ}*}, N_2^{\text{КОМ}*}, \dots, N_g^{\text{КОМ}*}, \dots, N_{g^{\text{КОМ}}}^{\text{КОМ}*}$) в неантагонистической игре позволяет определить значения $n_{ig}^{\text{КОМ}}$ для каждого i -го типа требований, для которых значения критериев (19) для всех игроков будут эффективными (с точки зрения реализации ситуации равновесия). Таким образом, выражение (19) определяет вид критерия для каждого g -го игрока, который выполняет выбор составов комплектов g -го типа, исходя из условия ми-

нимизации количества требований, обработанных в составе групп партий N^z . В процессе поиска решений на первом уровне системы выполняется обмен требованиями между составами комплектов разных типов N_g^{KOM} ($g = \overline{1, g^{\text{KOM}}}$), на втором уровне выполняемые игроками ходы (Z игроков) предполагают обмен партиями требований между группами партий N^z ($z = \overline{1, Z}$) при поиске эффективных составов групп партий.

Обобщая введенные выражения для критериев, используемых при определении эффективных решений на соответствующих уровнях иерархии системы (10), (12), представим модель многоуровневого программирования определения составов партий, групп партий и расписаний обработки групп при формировании комплектов требований в следующем виде:

первый уровень: а) $\min f_1^g$, $f_1^g = \sum_{i=1}^n (n_{i_g}^{\text{KOM}} - N_g^{\text{KOM}} \cdot w_{i_g})$ при $g = \overline{1, g^{\text{KOM}}}$;

второй уровень иерархии (определение состава групп партий): $\min f_2^z$,

$$f_2^z = \sum_{l=2}^L (t_{11}^{0l})^z + \sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^{n_p^j} \left[(t_{j1}^{0l})^z - \left[(t_{j-1, n_{j-1}}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^c} (t_h^l)^z \cdot p_{h, j-1}^z \right] \right] +$$

$$\sum_{l=2}^L \sum_{j=1}^{n_p^c} \sum_{q=2}^{n_j^c} \left[(t_{jq}^{0l})^z - \left[(t_{j, q-1}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^c} (t_h^l)^z \cdot p_{hj}^z \right] \right] + \sum_{l=1}^L \{ t^z - [(t_{n_p^c, n_p^c}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^c} (t_h^l)^z \cdot p_{h, n_p^c}^z] \}, \quad z = \overline{1, Z};$$

третий уровень иерархии (определение порядка обработки партий для группы): $\min f_3$,

$$f_3 = \sum_{l=2}^L (t_{11}^{0l})^z + \sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^{n_p^j} \left[(t_{j1}^{0l})^z - \left[(t_{j-1, n_{j-1}}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^c} (t_h^l)^z \cdot p_{h, j-1}^z \right] \right] +$$

$$\sum_{l=2}^L \sum_{j=1}^{n_p^c} \sum_{q=2}^{n_j^c} \left[(t_{jq}^{0l})^z - \left[(t_{j, q-1}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^c} (t_h^l)^z \cdot p_{hj}^z \right] \right].$$

ограничения на первом уровне иерархии для определения комплектов: $n_{i_g}^{\text{KOM}} / w_{i_g}$ – целочисленные (при $i = \overline{1, n}$ и $g = \overline{1, g^{\text{KOM}}}$);

ограничение на третьем уровне иерархии для длительности реализации

расписаний обработки партий группы N^z : $\max_l [(t_{n_p^c, n_p^c}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{n^c} (t_h^l)^z \cdot p_{h, n_p^c}^z] \leq t^z$.

Выводы. Результатом выполненных исследований является сформированная многоуровневая модель построения комплексных расписаний групповой обработки партий требований с формированием из обработанных требований комплектов заданных (различных) типов (при ограничении на время

реализации выполнения операций с требованиями групп партий). Достоинством использования сформированной модели является возможность определения: 1) эффективных составов партий (количество партий и число требований в них) таких, для которых общее количество требований, не вошедших в состав комплектов разных типов, будет минимальным, 2) эффективных составов групп партий, обрабатываемых в течение установленных временных интервалов, для которых общая эффективность использования оборудования системы будет максимальной (минимально неэффективное использование оборудования), 3) эффективного порядка обработки партий на приборах системы. При этом количество приборов в системе, количество групп партий, длительности обработки требований на приборах являются произвольными (т.е. отсутствуют какие-либо начальные упрощающие условия при поиске решений, задача решается в общем виде). Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку метода построения комплексных расписаний групповой обработки партий требований при формировании комплектов и наличии ограничений на длительности интервалов реализации операций с партиями требований в группах, соответствующего сформированной модели.

Список литературы: 1. *Петросян Л. А.* Теория игр. / *Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. А. Семина.* – М. : Высшая школа, 1999. – 300 с. 2. *Гермейер Ю. Б.* Игры с противоположными интересами. / *Ю. Б. Гермейер.* – М. : Наука, 1976. – 327 с. 3. *Ковалев М. М.* Модели и методы календарного планирования. Курс лекций. / *М. М. Ковалев.* – Минск : Изд-во БГУ, 2004. – 63 с. 4. *Кротов К. В.* Градиентный метод составления расписаний в многостадийной системе с одинаковым порядком обслуживания требований и одинаковым временем поступления. / *К. В. Кротов* // Сборник научных трудов «Оптимизация производственных процессов». вып. 12. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2010. – С.154–160.

Надійшла до редколегії 04.06.2013

УДК 519.2

Модель многоуровневого программирования построения расписаний обработки требований комплектов различных типов (при формировании групп партий)/ К. В. Кротов, В. Е. Шишкевич // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 62 (1035). – С. 21–39. – Бібліогр.: 7 назв.

У роботі обґрунтовується модель багаторівневого програмування для формування ефективного складу груп партій, розкладів виконання операцій з ними при обробці вимог, що входять у комплекти різних типів, при наявності обмежень на тривалість інтервалів роботи системи.

Ключові слова: багаторівневе програмування, теорія розкладів, партії вимог, групи партій, комплекти вимог.

In the paper, the multi-level programming model for efficient composition of the groups of parties, scheduling of operations with the processing of claims included in the kits of different types, with restrictions on the duration of the intervals of the system.

Keywords: multilevel programming, scheduling theory, the party claims of the parties, sets requirements.

Е. В. ЗРОЙЧИКОВА, асп. ХНУРЭ, Харьков;
Е. П. ПУТЯТИН, д-р техн. наук, проф. ХНУРЭ, Харьков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛОЖЕНИЙ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ЗАДАЧЕ НОРМАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Проанализированы различные разложения группы аффинных преобразований на подгруппы элементарных геометрических преобразований, выполненных последовательно. Исследовано влияние этих разложений на нормализацию изображений, проведен сравнительный анализ. Предлагается выбор параметров нормализации для каждого элементарного преобразования на основе моментных признаков изображения.

Ключевые слова: нормализация, аффинные преобразования, моментные признаки, обработка, параметры, разложение.

Введение. На сегодняшний день уровень развития информационных технологий достигает очень высоких показателей. В последние десятилетия значительно пополнился багаж теоретических и практических исследований, результаты которых с легкостью влились практически во все сферы человеческой жизни, начиная от бытовой и заканчивая космической. Несомненно, каждый день мы можем наблюдать применение современных компьютерных технологий, что значительно ускоряет и облегчает нашу жизнь.

Немаловажное место в этой нише занимает область компьютерного зрения, в частности обработка изображений. С появлением фото- и видеокамер изображения стали очень популярными и широко используемыми. Но зачастую снятые изображения предстают в неудобном виде для дальнейшей обработки. Поэтому первым и немаловажным этапом обработки изображений является их нормализация.

Задача и методы нормализации изображений. В общем виде задача нормализации изображений представляет собой приведение искаженного изображения к некоторому эталонному виду, определенному заранее. На практике данная задача сводится к определению параметров нормализации, связывающих входящее и эталонное изображения [1–4]. Довольно часто в качестве таких параметров выступают смещение вдоль осей координат, угол поворота, изменения масштаба (растяжение и сжатие) и другие.

Математически задача нормализации изображений описывается следующим образом. Пусть имеется множество входящих изображений I и множество эталонных изображений I_0 , а также группа геометрических преобразований G .

Изображения $B(x, y) \in I$ и $B_0(x, y) \in I_0$ эквивалентны между собой, если они связаны некоторым преобразованием $g \in G$:

$$B(x, y) = g \circ B_0(x, y).$$

Задача нормализации изображений сводится к нахождению такого обратного преобразования g^{-1} , чтобы входящее изображение приняло эталонный вид:

$$B_0(x, y) = g^{-1} \circ B(x, y).$$

Таким образом, для того чтобы привести входящее изображение к эталонному виду, необходимо определить параметры нормализации и применить соответствующий нормализатор с найденными параметрами.

Методы нормализации изображений делятся на параллельные и последовательные. В первом случае все параметры нормализации находятся одновременно и применяется один итоговый нормализатор. При использовании второго подхода на каждом этапе нормализации находится один параметр преобразования, после чего применяется соответствующий нормализатор конкретного искажения, и так до достижения эталонного вида. Хотя при параллельной нормализации процедура преобразования происходит за один шаг, этот подход требует значительных затрат ресурсов и обладает более высокой вычислительной сложностью, что может повлиять на точность нормализации при достаточно сложных комбинациях преобразований. Поэтому в условиях возможного разложения сложного нормализатора на совокупность простых довольно успешным является применение последовательных методов нормализации.

Цель исследования, постановка задачи. В ходе данного исследования рассматриваются геометрические преобразования аффинной группы G_a [1, 2, 5, 6]. Данную группу можно разложить на подгруппы элементарных преобразований, выполненных последовательно: G_1, G_2, \dots, G_n . Таким образом, элемент аффинной группы можно представить в виде композиции $g_a = g_1 g_2 \dots g_n$, $g_i \in G_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, также образующей аффинную группу.

Рассмотрим такие элементарные преобразования, как смещение вдоль осей $G_{c,x}$ и $G_{c,y}$; поворот на угол α вокруг оси, перпендикулярной плоскости изображения G_u ; однородное G_k и неоднородное масштабирование G_d , косой сдвиг $G_{h,x}$, $G_{h,y}$; гиперболический поворот G_q ; зеркальное отражение G_s . Используя данные преобразования, представим аффинную группу в виде их композиции:

$$G_a = G_u G_s G_d G_u G_{c,x} G_{c,y}; \quad (1)$$

$$G_a = G_u G_s G_q G_k G_u G_{c,x} G_{c,y}; \quad (2)$$

$$G_a = G_u G_s G_d G_{h,x} G_{c,x} G_{c,y}; \quad (3)$$

$$G_a = G_u G_s G_q G_k G_{h,x} G_{c,x} G_{c,y}. \quad (4)$$

Для нахождения параметров нормализации предлагается использовать моменты изображения [1, 8, 9]. В дискретном виде их можно представить с помощью следующего соотношения:

$$m_{pq} = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M B(x, y) x^p y^q, \quad (5)$$

где $N \times M$ – размеры растра D ;

p, q – показатели порядка момента.

В ходе исследования необходимо найти параметры нормализации с помощью моментов для каждой подгруппы преобразований и определить наиболее удачное разложение в пределах оцененной точности нормализации изображения.

Материалы исследования. Для нахождения параметров нормализации необходимо найти моменты нулевого, первого и второго порядков, используя соотношение (5). Очевидно, что момент нулевого порядка m_{00} показывает энергию изображения (сумма яркостей пикселей). Для того чтобы центрировать изображение, необходимо найти параметры преобразования смещения вдоль осей координат. Показателями этих величин являются моменты m_{10} и m_{01} , нормированные с помощью m_{00} . Таким образом,

смещение по оси Ox осуществляется на величину $\frac{m_{10}}{m_{00}}$, по оси Oy – на $\frac{m_{01}}{m_{00}}$.

Для нормализации преобразования поворота необходимо найти угол, на который нужно повернуть изображение. В этом случае можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2m_{11}}{m_{20} - m_{02}}.$$

Для нахождения параметров нормализации неоднородного масштаба $G_d : B(x, y) = B_0(\lambda x, \mu y)$ можно воспользоваться нормализатором

$F(B) = B\left(\sqrt{\frac{m_{20}}{m_{00}}}x, \sqrt{\frac{m_{02}}{m_{00}}}y\right)$ [1], который является универсальным для всех

реальных изображений. В условиях применения данного нормализатора эллипс инерции изображения превращается в круг. Однако при таком подходе может возникнуть проблема значительного уменьшения эталонного изображения так, что оно занимает слишком маленькую область зрения. Чтобы этого избежать, воспользуемся следующим методом. Проведем нормализацию изображения вдоль одной из осей, например оси Ox , таким образом, чтобы размеры изображения вдоль Ox и Oy стали равны. Для этого разделим параметры преобразования на один из них, в данном случае на

$\mu = \sqrt{\frac{m_{02}}{m_{00}}}$. Таким образом, нормализация сводится к преобразованию

$$B(x, y) = B_0' \left(\frac{\lambda}{\mu} x, y \right) = B_0'(rx, y), \text{ где } B_0' - \text{увеличенное (уменьшенное)}$$

эталонное изображение, $r = \sqrt{\frac{m_{20}}{m_{02}}}$. Для приведения полученного в результате нормализации изображения к размерам эталонного изображения необходимо

применить нормализатор однородного масштаба с коэффициентом $\sqrt{\frac{m_{00et}}{m_{00in}}}$, показывающим масштабную разницу этих изображений. В итоге получаем

$$B_0(\lambda x, \mu y) \Rightarrow B_0'(rx, y) \Rightarrow B_0(x, y).$$

Преобразование G_d может быть заменено комбинацией преобразований $G_q G_k$, как это предложено в соотношениях (2), (4). Исходя из предыдущих выкладок, в качестве коэффициента нормирования однородного масштаба G_k можно использовать величину k , найденную с помощью такого выражения:

$$k = \sqrt[4]{\frac{m_{20}}{m_{02}}}.$$

В свою очередь, для преобразования гиперболического поворота будем использовать параметр q , полученный следующим образом:

$$q = \sqrt[4]{\frac{m_{02}}{m_{20}}}.$$

Покажем, что преобразование $G_q G_k$ эквивалентно G_d с применением вышеуказанных параметров.

$$G_q G_k : B_0' (q^{-1}x, qy) B_0' (kx, ky) = B_0' \left(\frac{k}{q}x, qky \right);$$

$$B_0' \left(\frac{k}{q}x, qky \right) = B_0' \left(\sqrt[4]{\left(\frac{m_{20}}{m_{02}}\right)^2}x, \sqrt[4]{\frac{m_{02}}{m_{20}} \cdot \frac{m_{20}}{m_{02}}}y \right) = B_0' \left(\sqrt{\frac{m_{20}}{m_{02}}}x, y \right) = B_0' (rx, y).$$

После данного преобразования также необходимо применить нормализатор однородного масштаба для приведения изображения к эталонному размеру. Аналогично можно провести преобразования G_d , $G_q G_k$, выбрав ось Oy для нормализации.

Для нормализации косоугольного сдвига необходимо вычислить моменты m_{11} и m_{20} . Используя их, получим параметр нормализации:

$$h = \frac{m_{11}}{m_{20}}.$$

При нормализации зеркального отражения нужно выбрать характерную точку изображения и перевести ее в первый квадрант с помощью нормализатора $F(B) = B(x \operatorname{sign} x(B), y \operatorname{sign} y(B))$.

Отметим, что в случае нормализации комбинации элементарных преобразований необходимо пересчитывать моменты изображения на каждом этапе нормализации.

Результаты исследований. В качестве тестовых эталонных изображений были выбраны изображения размером 256×256 в формате bmp, представленные на рис. 1, а–д. Перед процедурой нормализации изображения переводились в оттенки серого (полутоновые изображения). В ходе экспериментов были проанализированы результаты нормализации отдельно каждого простейшего преобразования, а также их совокупности. Для этого были применены искажения с параметрами, представленными в табл. 1.

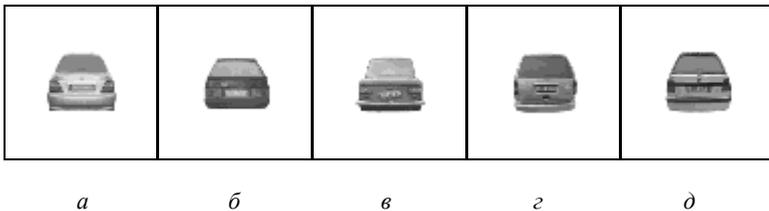


Рис. 1 – Тестовые эталонные изображения: а – 1.bmp; б – 2.bmp; в – 3.bmp; г – 4.bmp; д – 5.bmp

Таблица 1 – Исходные преобразования и их параметры

Преобразование	Параметры
Сдвиг	$s_x = 10, s_y = 30$
Поворот	$\varphi = 15^\circ$
Масштаб (однородный)	$k = 0,5$
Масштаб (неоднородный)	$\lambda = 0,5, \mu = 0,7$
Гиперболический поворот	$q = 0,7$
Косой сдвиг	$h_x = 1$
Зеркальное отражение	Относительно оси Ox
Сложное преобразование (сдвиг, поворот, масштаб, косой сдвиг)	$s_x = 10, s_y = 30, \varphi = 15^\circ, \lambda = 0,5, \mu = 0,7, h_x = 1$

Результаты нормализации преобразований приведены в табл. 2. Для оценки результатов преобразования использовался коэффициент корреляции, который в дискретном виде определяется так [1, 7]:

$$\delta(B_{norm}, B_0) = \frac{\sum_{i,j \in D} B_{norm}(i, j) B_0(i, j)}{\sqrt{\sum_{i,j \in D} B_{norm}^2(i, j) \sum_{i,j \in D} B_0^2(i, j)}}$$

где B_0 – эталонное изображение;

B_{norm} – нормализованное изображение.

Таблица 2 – Результаты нормализации (δ)

δ	Изображения				
	1.bmp	2.bmp	3.bmp	4.bmp	5.bmp
Сдвиг	0,99824	0,99916	1	0,99895	0,99852
Поворот	0,99978	0,99926	0,99995	0,99594	0,99589
Масштаб (однородный)	0,99838	0,99649	0,99758	0,99920	0,99960
Масштаб (неоднородный)	0,99826	0,99732	0,99837	0,99562	0,99927
Гиперболический поворот	0,99875	0,99679	0,99791	0,99924	0,99937
Косой сдвиг	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999
Зеркальное отражение	1	1	1	1	1
Сложное преобразование, (1)	0,99779	0,99695	0,99582	0,99725	0,99473
Сложное преобразование, (2)	0,99336	0,99094	0,99152	0,99456	0,99285
Сложное преобразование, (3)	0,99451	0,99372	0,99575	0,99636	0,99460
Сложное преобразование, (4)	0,99371	0,99310	0,99529	0,99451	0,99254

Используя результаты нормализации из табл. 2, построим графики зависимости коэффициента корреляции от выбранной группы разложения аффинных преобразований (1)–(4) для последовательной нормализации изображений из рис. 1, $a-d$, искаженных сложным аффинным преобразованием. Построенные графики представлены на рис. 2.

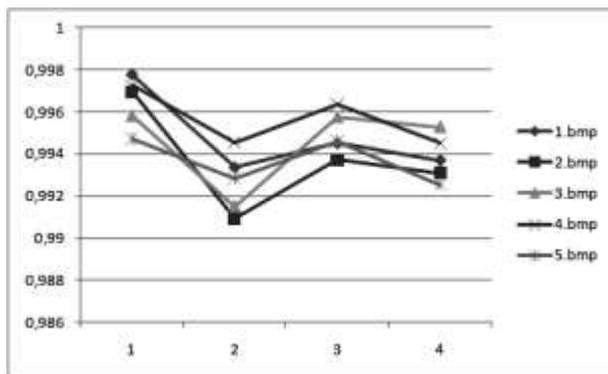


Рис. 2 – Графики зависимости коэффициента корреляции от группы разложения аффинных преобразований

Выводы. В работе рассматривается метод последовательной нормализации изображений в условиях сложных геометрических трансформаций, позволяющий на каждом этапе нормализации компенсировать простейшие искажения. Последовательная нормализация аффинных преобразований является достаточно эффективным методом приведения искаженного изображения к эталонному виду и обладает не очень высокой вычислительной сложностью. В ходе исследования нормализации аффинных преобразований были предложены параметры нормализации каждого из простейших искажений, которые также были применены в компенсации сложных аффинных преобразований. Экспериментальный анализ показал достаточно высокую точность нормализации с выбранными коэффициентами.

Из предложенных разложений аффинных преобразований (1) – (4) худшие результаты нормализации показали разложения (2) и (4), содержащие преобразования гиперболического поворота и однородного масштаба. Это можно объяснить тем, что по сравнению с разложениями (1) и (3) количество операций масштабирования увеличено на одну, что незначительно повлияло на точность нормализации. В свою очередь, лучшие результаты нормализации показала группа (1).

Дальнейшие исследования могут быть направлены на усовершенствование метода нормализации преобразования масштаба с целью улучшить точность результатов. Полезными являются исследования

нормализации изображений с помощью разложений (1)–(4) в условиях действия шума. Интерес представляет анализ метода нормализации при больших углах поворота изображений.

Список литературы: 1. *Пуятин Е. П.* Обработка изображений в робототехнике / *Е. П. Пуятин, С. И. Аверин.* – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с. 2. *Пуятин, С. П.* Методы та алгоритми комп'ютерного зору: навч. посібник / *С. П. Пуятин, В. О. Гороховатський, О. О. Матат.* – Х. : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 236 с. 3. *Пуятин, Е. П.* Проблема распознавания изображений в системах технического зрения / *Е. П. Пуятин* // Проблемы бионики. – Х. : ХТУРЭ, 1999. – Вып. 50. – С. 3–11. 4. *Pei, S. C.* Image normalization for pattern recognition / *S. C. Pei, C. N. Lin* // Image and Vision Computing. – Vol. 13. – 1995. – № 8. – P. 711–723. 5. *Hartley, R.* Multiple view geometry in computer vision, Second Edition / *R. Hartley, A. Zisserman.* – Cambridge : Cambridge university press, 2003. – 655 p. 6. *Моденов П. С.* Геометрические преобразования / *П. С. Моденов, А. С. Пархоменко.* – М. : МГУ, 1961. – 232 с. 7. *Грузман И. С.* Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебн. пособие / *И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых [и др.].* – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с. 8. *Kotoulas, L.* Image analysis using moments / *L. Kotoulas, I. Andreadis* // 5th Int. Conf. on Technology and Automation. – Greece, 2005. – P. 360–364. 9. *Wang, X.-Y.* A New Robust Digital Image Watermarking Based on Pseudo-Zernike Moments / *X.-Y. Wang, L.-M. Hou, H.-Y. Yang* // Multidimensional Systems and Signal Processing. – Vol. 21. – 2010. – № 2. – P. 179–196.

Надійшла до редколегії 22.02.2013

УДК 681.3.07

Сравнительный анализ разложений аффинных преобразований в задаче нормализации изображений / Е. В. Зройчикова, Е. П. Пуятин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 40–47. – Бібліогр.: 9 назв.

Проаналізовано різні розклади групи афінних перетворень на підгрупи елементарних геометричних перетворень, виконаних послідовно. Досліджено вплив цих розкладів на нормалізацію зображень, проведено порівняльний аналіз. Пропонується вибір параметрів нормалізації для кожного елементарного перетворення на базі моментних ознак зображення.

Ключові слова: нормалізація, афінні перетворення, моментні ознаки, обробка, параметри, розклад.

There have been analyzed different decompositions of affine transformations on the subgroup of elementary geometric transformations performed sequentially. The influence of these decompositions to image normalization has been investigated, the comparative analysis has been made. There have been proposed a choice of normalization parameters for each elementary transformation based on the image moment characteristics.

Keywords: normalization, affine transformations, moment characteristics, processing, parameters, decomposition.

Л. В. ШИПУЛИНА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
О. А. ТАТАРИНОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Ю. Н. КОРЫТКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА ОРИЕНТАЦИЮ

Рассматривается задача управления переориентацией космического аппарата с помощью минимально-избыточного гироскопического комплекса. Для определения управляющих скоростей прецессии гироскопов использовалась опорная сферическая модель в кватернионной форме с учетом ограничения на ориентацию. Приведено графическое изображение изменения угловых скоростей гироскопов при минимальном времени переориентации.

Ключевые слова: переориентация, гироскопический комплекс, опорная сферическая модель, угловые скорости.

Введение. Предлагаются два алгоритма управления переориентацией космического аппарата с помощью минимально-избыточного гироскопического компланарной и тетраэдрной конфигурации. Проведено численное моделирование и даны рекомендации по использованию разработанных алгоритмов.

Постановка задачи. Рассматривается управление переориентацией космического аппарата (КА) с помощью избыточной системы гироскопов (СГК) при условии, что полуось \vec{z} КА в течение маневра не должна заходить в область ограничений, заданную конусом с осью \vec{k} и углом полурастра δ .

Угловое движение КА описывается системой динамических и кинематических уравнений [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{K}} + \dot{\vec{H}} &= \vec{M}; \\ \dot{\Lambda} &= \frac{1}{2} \Lambda \circ \vec{\omega}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\vec{K} = \vec{I}\vec{\omega}$ и \vec{H} – кинетические моменты твердого тела и системы гироскопов;

\vec{M} – внешний момент;

Λ – кватернион, определяющий угловое положение КА относительно опорного базиса;

$\vec{\omega}$ – угловая скорость КА в проекциях на связанный базис.

Решение задачи управления переориентацией космического аппарата. Управление переориентацией осуществляется путем выбора управляющих скоростей прецессии гироскопов (ГД), реализующих производ-

ную потребного кинетического момента $\dot{\bar{H}}_i = \bar{M} - \dot{\bar{K}}$ и переводящих КА из заданного начального в конечное состояние за время T :

$$\begin{aligned} t = 0: \quad \Lambda_0 &= \lambda_0 + \bar{\lambda}, \quad \bar{\omega}_0; \\ t = T: \quad \Lambda_T &= (1, 0, 0, 0), \quad \bar{\omega}_T \end{aligned} \quad (2)$$

Ввиду того, что решение кинематического уравнения (1) в общем случае не может быть найдено в аналитической форме, для реализации режима переориентации используется опорная сферическая модель в кватернионной форме [1–3]:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \Lambda_1 \circ \Lambda_2 \circ \Lambda_3, \quad \Lambda_i = c_i + \bar{b}_i s_i, \quad |\bar{b}_i| = 1, \\ c_i &= \cos \frac{\Psi_i}{2}, \quad s_i = \sin \frac{\Psi_i}{2}, \quad i = \overline{1, 3}. \end{aligned}$$

Векторы \bar{b}_i и зависимости $\Psi_i(t)$ выбираются из условия удовлетворения краевым условиям (2) и ограничению на ориентацию, что позволяет в каждый текущий момент времени t определять $\Lambda(t)$, $\bar{\omega}(t)$, $\dot{\bar{\omega}}(t)$, $\dot{\bar{H}}_i$ и реализовать $\dot{\bar{H}}_i$ системой гиродинов [2].

Для определения управляющих скоростей прецессии гиродинов, реализующих $\dot{\bar{H}}_i$, рассматривался минимально-избыточный гироскомплекс, состоящий из четырех гиродинов, образующих компланарную или тетраэдрную конфигурацию [3].

При компоновке четырех гиродинов в компланарную систему с попарно параллельными осями прецессии, изменение суммарного вектора кинетических моментов ГД определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{x1} &= -\dot{\beta}_1 \sin \beta_1 + \dot{\beta}_3 \sin \beta_3, \\ \dot{H}_{y1} &= -\dot{\beta}_2 \sin \beta_2 + \dot{\beta}_4 \sin \beta_4, \\ \dot{H}_z &= \dot{\beta}_1 \cos \beta_1 - \dot{\beta}_3 \cos \beta_3 + \dot{\beta}_2 \cos \beta_2 - \dot{\beta}_4 \cos \beta_4, \end{aligned} \quad (3)$$

где β_i ($i = \overline{1, 4}$) – углы отклонения кинетических моментов ГД от плоскости осей прецессии xu ;

$\dot{\beta}_i$ – угловые скорости прецессии ГД;

x_1, y_1 – оси прецессии ГД, располагающиеся под углом 45° к связанным осям x, y КА;

$\dot{H}_{x1}, \dot{H}_{y1}, \dot{H}_z$ – проекции $\dot{\vec{H}}_j$ [4].

Кинетический момент \vec{H} , создаваемый СГК тетраэдрной конфигурации, в проекции на оси связанной системы координат имеет вид [3, 5]:

$$H_k = \sum_{i=1}^4 (a_{ki} \cos \beta_i + b_{ki} \sin \beta_i), \quad k = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где a_{ki}, b_{ki} – постоянные коэффициенты, определяемые по компонентам нормалей к граням тетраэдра;

β_i – углы прецессии гиридинов.

Продифференцировав (4) по времени, получим проекции $\dot{\vec{H}}_j$ на оси связанной системы координат:

$$\dot{H}_k = \sum_{i=1}^4 \dot{\beta}_i d_{ki}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (5)$$

$$d_{ki} = -a_{ki} \sin \beta_i + b_{ki} \cos \beta_i.$$

Левые части уравнений (3) и (5) известны (рассчитываются по опорной модели), поэтому можно определить управляющие скорости прецессии гиридинов $\dot{\beta}_i$. Но так как уравнений всего три, а неизвестных $\dot{\beta}_i$ четыре, то системы (3) и (5) необходимо дополнить еще одним уравнением. Дополнительное уравнение можно получить из условия:

$$\dot{\beta}_4 - \dot{\beta}_2 = \dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_1, \quad (6)$$

которое выражает равномодульное приращение углов между кинетическими моментами ГД каждой пары на такте управления Δt [6]. Выполнение условия (6) приводит к тому, что при вырождении уравнений одной пары ГД (при угле между кинетическими моментами ГД, равном нулю или 180°) управление осуществляется в основном второй парой, за счет чего первая пара быстро проходит критическую точку.

Разрешая систему уравнений (3) с условием (6) и систему (5) с (6) относительно $\dot{\beta}_i$, получаем управляющие скорости прецессии гиридинов.

Проведено численное моделирование режима переориентации с использованием компланарной и тетраэдрной конфигурации СГК.

На рис. 1 и рис. 2. приведено изменение угловых скоростей прецессии гиридинов. Было найдено минимальное время переориентации T , при котором выполняется ограничение на скорость прецессии ГД $|\dot{\beta}_i| \leq \dot{\beta}_{\max}$.

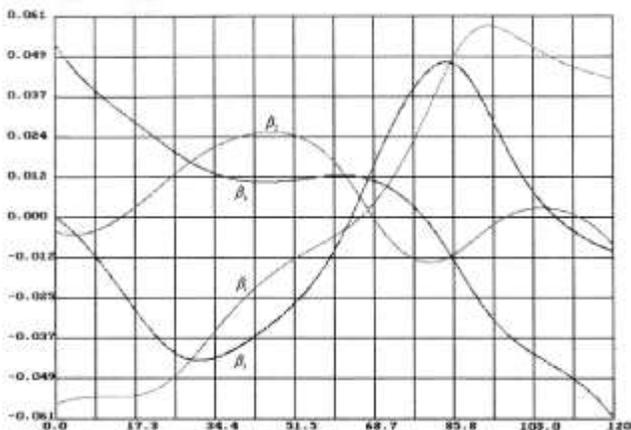


Рис. 1 – Угловые скорости прецессии гиродинов для компланарной конфигурации

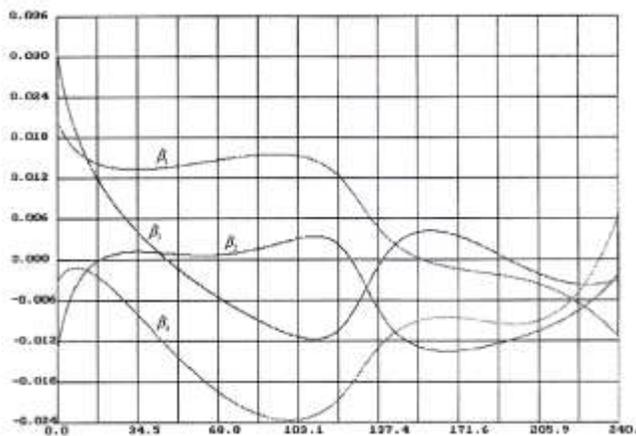


Рис. 2 – Угловые скорости прецессии гиродинов для тетраэдрной конфигурации

Выводы. Сравнивая результаты для компланарной и тетраэдрной конфигурации СГК-4, можно отметить, что для компланарной схемы время переориентации вдвое меньше, чем для тетраэдрной схемы. Это объясняется тем, что для компланарной схемы алгоритмы управления гиродинами являются более простыми и одновременно более эффективными вследствие простой геометрической организации системы, допускающей наглядную интерпретацию поведения коллинеарных пар ГД в ходе управления.

Заклучение. Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять режим переориентации с учетом ограничения на угловую скорость прецессии гироскопов. Показано, что применение компланарной конфигурации гироскопов является более эффективной и предпочтительной для практического использования.

Список литературы: 1. *Бранец В. Н., Шмыглевский И. П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973. – 320 с. 2. *Шипулина Л. В., Овчарова Д. К.* Управление разворотом космического аппарата при ограничении на ориентацию. // Вестник ХГПУ: Сб. науч. трудов. Выпуск 57. – Х.: ХГПУ, 1999. – С. 79–81. 3. *Успенский В. Б.* Теоретические основы гиросилового управления ориентацией космического летательного аппарата: Монография. – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 328 с. 4. *Шипулина Л. В., Середа Н. В.* Алгоритмы управления минимально избыточной гироскопической системой при разворотах космических аппаратов по опорным моделям. – Х., 1991. – 12 с. Деп. В УкраинНИИТИ № 1114-Укр91. 5. *Успенский В. Б., Малышев К. М.* Методика оптимизации структуры силового гироскопического комплекса // Механика и машиностроение. – 1999. – № 2. – С. 125–131. 6. *Карначев Ю. А., Павловский М. А.* Равномодульное управление минимально избыточной компланарной структурой гироскопов с ортогонально ориентированными осями подвеса гироскопов. // Механика гироскопических систем. – К., 1986. – № 5.

Поступила в редколлегию 15.10.2013

УДК 629.783

Управление переориентацией космического аппарата с ограничением на ориентацию / Л. В. Шипулина, О. А. Татарина, Ю. Н. Корытко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 48–52. – Бібліогр: 6 назв.

Розглядається задача управління переорієнтацією космічного апарату за допомогою мінімально-надлишкового гідрокомплексу. Для визначення управляючих швидкостей прецесії гіроскопів використовувалась опорна сферична модель у кватерніонній формі з урахуванням обмеження на орієнтацію. Наведено графічне зображення зміни кутових швидкостей гіроскопів при мінімальному часі переорієнтації.

Ключевые слова: переориентация, гидрокомплекс, опорная сферическая модель, кутовые швидкості.

The problem of the control of the space vehicle reorientation is considered in the paper with using minimal redundant gyrocomplex. The abutting spherical model in quaternion form was used for defining the control velocities of the gyroscopes precession. Graphic plots of the gyroscopes angular velocities changing is presented for minimal reorientation time.

Keywords: reorientation, gyrocomplex, abutting spherical model, angular velocities.

Г. О. МАРКАРЯН, канд. техн. наук, доц. ДЮІ МВС України, Донецьк

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТА МОНІТОРИНГУ КРЕДИТНИХ ОПЕРАЦІЙ ЯК ІНСТРУМЕНТАРІЙ ПРОТИДІЇ ЛЕГАЛІЗАЦІЇ ДОХОДІВ, ОДЕРЖАНИХ ЗЛОЧИННИМ ШЛЯХОМ

Запропоновано інструментарій протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, заснований на методології системного аналізу та зв'язку з функціональними особливостями системи управління кредитуванням. Проведено аналіз фінансового моніторингу та банківської діяльності, представлено структуру системи управління та моніторингу кредитних операцій, сформульовано критерії прийняття рішень, розроблено програмне забезпечення.

Ключові слова: система управління, інформаційні технології, легалізація доходів, фінансовий моніторинг, кредитно-фінансова діяльність.

Вступ. Розвиток світової фінансової системи та глобалізація інформаційно-комунікаційних технологій дозволили значно спростити процедуру переказу грошових коштів, що створило сприятливе підґрунтя для операцій, пов'язаних з легалізацією доходів, одержаних злочинним шляхом. Незважаючи на низку заходів, здійснених Україною на шляху до забезпечення прозорості та законності фінансових операцій, однією з розповсюджених проблем сьогодення є розкрадання коштів банківських установ та інших фінансових компаній. За підсумками аналізу Департаменту фінансових розслідувань Державної служби фінансового моніторингу України, найпоширенішими предикатними злочинами у кредитно-фінансовій сфері є отримання кредитів з метою розкрадання з використанням фіктивних документів, привласнення грошових коштів за підробленими банківськими документами та цінними паперами, переведення та привласнення грошових коштів із застосуванням банківських комп'ютерних мереж тощо [1].

Наведені фактори визначають актуальність впровадження в діяльність фінансових установ новітніх розробок з використанням сучасних інформаційних технологій для оптимізації кредитно-фінансової діяльності та забезпечення прозорості фінансових операцій з метою протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансуванню тероризму.

Аналіз існуючих публікацій. Окремим питанням протидії легалізації доходів, отриманих злочинним шляхом, присвячені праці О.М. Бандурки, А.С. Беніцького, М.В. Бондаревої, В.А. Журавля, О.В. Ківець. Зауважимо, що дослідники приділяють увагу переважно правовим аспектам проблеми, проте опрацювання шляхів її розв'язання потребує системного підходу. Водночас, питання моделювання та інформаційного забезпечення діяльності фінансових установ в сфері протидії легалізації доходів, отриманих злочинним шляхом, залишається недостатньо висвітленим.

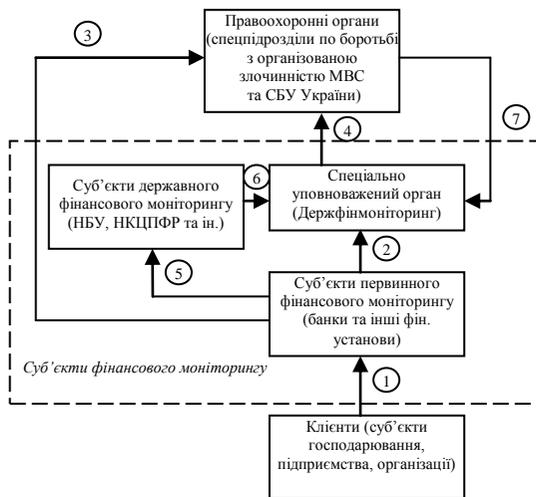
Розглядаючи означену проблему з позиції банківського управління, слід вказати, що автором проведено ряд досліджень в сфері управління кредитно-фінансовою діяльністю банків, розроблено систему прийняття рішень при плануванні та оперативному управлінні кредитуванням [2]. На підставі цих розробок вдосконалено модель прийняття управлінських рішень при реалізації банками кредитно-фінансової політики, спрямованої на запобігання легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом.

Мета дослідження полягає у створенні інструментарію запобігання або протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, на підставі моделі прийняття управлінських рішень банківських установ при реалізації кредитно-фінансової політики. Для розв'язання цієї задачі проведено системний аналіз фінансового моніторингу та діяльності банків як складової цієї системи; визначено структуру системи управління кредитуванням; сформульовано критерії прийняття рішень; створено програмне забезпечення.

Результати дослідження. В Україні для протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансуванню тероризму, функціонує система фінансового моніторингу, що, відповідно до Закону України «Про запобігання та протидію легалізації (відмиванню) доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансуванню тероризму», складається з двох рівнів – державного та первинного. Суб'єктами першого рівня постають державні органи, що забезпечують формування та реалізацію державної політики у сфері запобігання і протидії легалізації (відмиванню) доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансуванню тероризму, серед яких слід виділити Спеціально уповноважений орган – Державну службу фінансового моніторингу України (Держфінмоніторинг); на другому рівні розташовані банки, страховики, кредитні спілки, ломбарди, платіжні організації, товарні та фондові біржі, професійні учасники ринку цінних паперів, компанії з управління активами та інші установи, які надають фінансові послуги. Об'єктом фінансового моніторингу постають дії з активами за умови наявності ризиків їх використання з метою легалізації (відмивання) доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансування тероризму, а також будь-яка інформація про такі дії чи події, активи та їх учасників [3].

Нижче на рисунку представлено модель системи фінансового моніторингу, у складі якої виділено підсистему суб'єктів первинного та державного моніторингу (відповідно до закону [3]), клієнтів фінансових установ, оскільки вони постають джерелами первинної інформації, та правоохоронних органів, що здійснюють боротьбу з організованою злочинністю у сфері легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом.

Проведене дослідження взаємозв'язків між елементами цієї системи дозволило виявити, що первинна інформація формується на рівні суб'єктів первинного фінансового моніторингу, які отримують від своїх клієнтів доручення на переказ коштів та здійснення інших фінансових операцій (маркер (1) на рисунку), а також відомості щодо їх фінансового стану.



Система фінансового моніторингу України

Серед масиву заявлених фінансових операцій відокремлюються ті, які підлягають обов'язковому фінансовому моніторингу, про що повідомляється Спеціально уповноважений орган (2). У разі наявності достатніх підстав вважати, що фінансова операція пов'язана з легалізацією доходів, одержаних злочинним шляхом, або спрямована на фінансування тероризму, інформація подається до правоохоронних органів та розвідувальних органів України для здійснення оперативно-розшукової діяльності (3–4). Крім того, суб'єкт первинного фінансового моніторингу надає на запит суб'єкта державного фінансового моніторингу інформацію, необхідну для перевірки фактів порушення вимог законодавства у сфері запобігання та протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансуванню тероризму (5). Від суб'єктів державного моніторингу дані потрапляють до Держфінмоніторингу (6). До цього органу надходить інформація від правоохоронних органів про хід розгляду поданих матеріалів (7).

Основною ланкою в системі фінансового моніторингу постає Держфінмоніторинг, де акумулюються масиви даних про фінансову діяльність суб'єктів господарювання, яка може бути пов'язана з легалізацією доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансуванням тероризму. Отримана інформація піддається всебічному та комплексному аналізу.

Для забезпечення інформаційної взаємодії державних органів, реалізації державної політики у сфері запобігання та протидії легалізації злочинних доходів функціонує «Єдина державна інформаційна система у сфері запобігання та протидії легалізації (відмиванню) доходів, одержаних злочинним шляхом, і фінансуванню тероризму» (ЄІС) [4]. Незважаючи на

широке коло задач, реалізованих в ЄІС, ця система призначена для організації взаємодії суб'єктів державного фінансового моніторингу та правоохоронних органів. При цьому питання інформаційного забезпечення діяльності суб'єктів первинного фінансового моніторингу, зокрема банків, останні мають вирішувати самостійно. Існуючі програмні продукти для банківського сектору призначені передусім для збору, аналізу та зберігання інформації про фактично проведені транзакції, які підлягають фінансовому моніторингу, та не вирішують проблему запобігання легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом. Проте, на нашу думку, ефективність протидії цьому негативному явищу залежить від побудови грамотної кредитно-фінансової політики банківських та інших фінансових установ.

Аналіз положень нормативно-правових актів, які регламентують особливості банківської діяльності, дозволив виявити певну конвергенцію завдань, які необхідно вирішувати як при проведенні фінансового моніторингу, так і при реалізації кредитної політики: 1) аналіз фінансового стану клієнта, що дозволяє переконатися у відповідності фінансових операцій, які проводяться останнім з використанням поточного та кредитного рахунків, та уможлиблює визначення його кредитоспроможності; 2) прогнозування грошових потоків клієнта, що при значних відхиленнях «прогноз-факт» дає підставу для первинного фінансового моніторингу, крім того, оскільки клієнтські кошти є джерелом кредитних ресурсів, це дає змогу визначити обсяг коштів, які можна залучити до кредитування; 3) управління ризиками, як щодо легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, так і кредитними ризиками [3, ст. 6; 5, ст.ст. 47, 49].

У зв'язку з цим цілком доречним постає використання системи управління кредитуванням у якості інструментарію протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом. Для забезпечення кредитно-фінансової діяльності у складі цієї системи функціонують п'ять підсистем: аналізу кредитоспроможності, формування кредитних ресурсів, кредитного моніторингу, планування та оперативного управління.

У підсистемі аналізу кредитоспроможності проводиться оцінка кредитоспроможності позичальників та умов кредитування. По-перше, в залежності від кредитної історії, клієнтів розподілено за трьома групами надійності: надійних, середньої надійності і ненадійних. Задача оптимізації полягає у формуванні портфелю кредитних замовлень так, щоб забезпечити максимальну ймовірність повернення кредитів:

$$I_1 = \prod_{j=1}^m P_j(S_{ij} \setminus A) = \prod_{j=1}^m \frac{P_j(S_{ij}) P_j(A \setminus S_{ij})}{\sum_{i=1}^{n_j} P_j(S_{ij}) P_j(A \setminus S_{ij})} \xrightarrow{s_j} \max, \quad (1)$$

$$0,75 \leq P_j(S_{ij} \setminus A) \leq 1$$

де S_{ij} – обсяг замовленого кредиту; A – умова повернення кредиту; $P(S_{ij}|A)$ – апостеріорна ймовірність замовлення на кредит S_{ij} за умовою його повернення; $P(S_{ij})$ – апріорна ймовірність замовлення на кредит S_{ij} ; $P(A|S_{ij})$ – ймовірність повернення кредиту в обсязі S_{ij} ; m – кількість замовників; n_j – кількість кредитів, наданих j -му клієнту.

По-друге, на підставі фінансових показників визначається рейтинг позичальників та проводиться їх ранжування за групами ризику. Для оцінки можливості кредитування у заявленому обсязі здійснюється прогнозування руху грошових коштів позичальника на заданий термін. Задача управління полягає у формуванні кредитного портфелю, щоб частка інвестицій, які вкладаються в кредитування надійних клієнтів, була максимальною:

$$I_2 = \sum_{i=1}^n S_i (P(X \setminus S_i)) \xrightarrow{S_i} \max, \quad \sum_{i=1}^n S_i \leq V \quad (2)$$

де S_i – обсяг i -го заявленого кредиту; V – обсяг ресурсів, що інвестуються у кредитування; $P(X_j|S_i)$ – ймовірність належності клієнта до надійних класів X за умовою кредитного замовлення в сумі S_i ; n – кількість замовлень на кредит.

На даному етапі реалізовано алгоритми перевірки відповідності фінансових операцій клієнта інформації про зміст його діяльності та фінансовий стан. Виявлені розбіжності дають підставу для фінансового моніторингу. Рішення задачі передаються для оцінки умов кредитування.

Для певного обсягу заявок на кредит визначається можливість видачі кредиту та оцінка умов кредитування: обсягу, терміну та відсоткової ставки. Метою управління є забезпечення мінімального терміну погашення виплат по кредитах при формуванні кредитного портфелю:

$$I_3 = \sum_{i=1}^n S_i \sum_{t=1}^{T_i} \frac{(a_{it}(t) + (1 - a_{it-1}(t))) \cdot PS_i \cdot N_i}{e^{r_i h_i} \cdot h_i} \cdot t \xrightarrow{S_i, N_i, PS_i \geq 0} \min \quad \sum_{i=1}^n S_i \leq V \quad (3)$$

де S_i – обсяг i -го замовленого кредиту; N_i – термін кредитування; PS_i – розмір відсоткової ставки за i -м кредитом; h_i – кількість виплат, пов'язаних з погашенням кредиту та відсотків; $a_i(t)$ – частка погашення кредитної заборгованості із загального обсягу i -го кредиту в момент часу t , T_i – термін до погашення i -го кредиту; r_i – очікувана дохідність за i -м кредитом.

У підсистемі формування кредитних ресурсів здійснюється прогнозування грошових потоків клієнтів банку та інших власних і залучених банківських коштів, з яких формуються кредитні ресурси. Для цього розроблено динамічну детерміновану модель, представлену у вигляді системи параметричних диференційних рівнянь, що описують рух коштів кожного з клієнтів (мікрорівень), сукупність клієнтських коштів (середній рівень) та сукупність усіх банківських коштів (макрорівень), серед яких визначається обсяг вільних кредитних ресурсів [6].

Запропонована модель дозволяє, з одного боку, збалансувати обсяги кредитування та наявні кредитні ресурси, а з іншого, виявляти нехарактерні для клієнта грошові операції при проведенні первинного фінансового моніторингу. Отримані значення передаються в інші підсистеми, де постають обмеженнями в критеріях прийняття рішень.

Підсистема планування. Задача планування полягає в тому, щоб відповідно до обсягу кредитних замовлень визначити умови кредитування так, щоб сформувати максимально прибутковий кредитний портфель:

$$I_4 = \sum_{i=1}^{n_3} \frac{S_i}{V} \left(1 + \frac{PS_i \cdot N_i}{365} \right)^{\frac{1}{h_i}} \xrightarrow{S_i, N_i, PS_i > 0} \max \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_j} P_i \cdot P_i^* \cdot r_i \geq r \cdot (1 - \varepsilon) \\ 0 < V \leq y_{кр} \end{cases} \quad (5)$$

де I_4 – дохід кредитного портфеля; S_i – обсяг i -го кредиту, PS_i – відсоткова ставка за i -м кредитом; N_i – термін кредитування; V – обсяг вільних кредитних ресурсів; h_i – кількість виплат, пов'язаних з погашенням кредиту та відсотків; P_i – надійність клієнта, що кредитується, за умовами кредитування, близькими до замовлених; P_i^* – кредитоспроможність клієнта, визначена на підставі його фінансової звітності; r_i – очікувана дохідність за кредитом; ε – ступінь ризику, $y_{кр}$ – обсяг доступних кредитних ресурсів.

Мета *підсистеми оперативного управління* – отримання максимального доходу від кожної кредитної операції при обмеженому кредитному ризику:

$$I_5 = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_i} So_i(a_{it}(t) + (1 - a_{it-1}(t))) \cdot PSo_i \frac{No_i}{h_i} \xrightarrow{So_i, No_i, PSo_i > 0} \max \quad (6)$$

де So_i – обсяг кредиту в оперативному режимі; No_i – термін кредитування в оперативному режимі; PSo_i – розмір відсоткової ставки за i -м кредитом в оперативному режимі; h_i – кількість виплат, пов'язаних з погашенням кредиту та відсотків; $a_{it}(t)$ – частка погашення кредитної заборгованості із загального обсягу i -го кредиту клієнта в момент часу t , T_i – термін до погашення i -го кредиту; r_i – очікувана дохідність за кредитом.

Система обмежень аналогічна (5). Якщо рішення щодо видачі кредиту суперечить заявці, клієнтові пропонується змінити умови кредитування. За згодою клієнта заявка з новими умовами надходить в якості вхідної змінної.

Підсистема кредитного моніторингу. Оцінка ефективності управління кредитним портфелем заснована на результатах кредитного моніторингу, в процесі якого досліджується динаміка грошових потоків та фінансових показників позичальників, дохідність портфеля; ступінь ризику. З цією метою

задача управління полягає у забезпеченні мінімального стандартного відхилення прибутковості кредитного портфеля від очікуваної:

$$I_6 = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (r_t - r_p)^2}{T-1}} \xrightarrow{T, r_p} \min \quad (7)$$

де r_t – дохідність портфеля за період t ; r_p – очікувана дохідність портфеля; T – періодичність виплат за кредитами, що входять до кредитного портфелю.

З точки зору фінансового моніторингу, банки повинні управляти ризиком легалізації (відмивання) доходів, одержаних злочинним шляхом, та фінансування тероризму на підставі критеріїв, визначених законодавством [7], а також розробляти власні критерії. Вважаємо, що в даному випадку припустимо використовувати методи управління кредитним ризиком. Обґрунтуванням цієї точки зору є те, що банк зацікавлений у кредитуванні максимально надійних клієнтів, а їх віднесення до такої категорії здійснюється на підставі комплексного та ретельного аналізу.

Для пошуку екстремумів функціоналів використано метод Ньютон-Рафсона. Представлена модель уможливила розробку інформаційного забезпечення системи управління кредитуванням. Інформаційні масиви зберігаються в базі даних, організованій за допомогою СКБД Interbase SQL Server, перевагою якої є її кросплатформеність. На підставі алгоритмів функціональних підсистем створено програмний комплекс, реалізований в середовищі Delphi 7. Крім того, оскільки запропонована система забезпечує управління кредитуванням та кредитний моніторинг, її доцільно вважати системою управління та моніторингу кредитних операцій.

Висновки. Проведене дослідження показало, що в Україні для забезпечення протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, функціонує ієрархічна система фінансового моніторингу, елементи якої взаємодіють між собою, забезпечуючи оперативний обмін інформацією. Представлено модель цієї системи, структуровано інформаційні потоки між її елементами. На підставі аналізу норм діючого законодавства в сфері регулювання банківської діяльності виявлено конвергенцію завдань, що вирішуються банками як при проведенні первинного фінансового моніторингу, так і при реалізації кредитно-фінансової політики, у зв'язку з чим запропоновано інструментарій протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, заснований на моделі системи прийняття управлінських рішень при кредитуванні. Визначено структуру системи управління кредитуванням, розроблено критерії прийняття рішень при реалізації банками кредитно-фінансової політики, створено програмне забезпечення. Представлений підхід для протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом, та забезпечення його реалізації являє наукову новизну дослідження.

Список літератури: 1. Актуальні методи і способи легалізації (відмивання) доходів, одержаних злочинним шляхом, та фінансування тероризму [Електронний ресурс] / Веб-сайт Державної служби фінансового моніторингу України. – 2013. – Режим доступу : http://sdfm.gov.ua/content/file/Site_docs/2012/20121228/2012_27_12_2012.pdf. 2. Маркарян А. О. Система прийняття управленческих решений при кредитовании металлургических предприятий : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.01 / Маркарян Анна Оганесовна. – М. : МИСиС, 2005. – 181 с. 3. Про запобігання та протидію легалізації (відмивання) доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансуванню тероризму : Закон України від 28.11.2002 № 249-IV [Електронний ресурс] / Веб-сайт Верховної Ради України. – 2013. – Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/249-15>. 4. Про єдину державну інформаційну систему у сфері запобігання та протидії легалізації (відмивання) доходів, одержаних злочинним шляхом, і фінансуванню тероризму : Постанова КМУ від 10.12.2003 № 1896 [Електронний ресурс] / Веб-сайт Верховної Ради України. – 2013. – Режим доступу : <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1896-2003-%D0%BF>. 5. Про банки і банківську діяльність : Закон України від 07.12.2000 № 2121–III [Електронний ресурс] / Веб-сайт Верховної Ради України – 2013. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2121-14/page>. 6. Маркарян А. О. Динамическая модель прогноза выдачи кредитов / А. О. Маркарян // Искусственный интеллект. – 2003. – № 3. – С. 368–373. 7. Про затвердження Критеріїв, за якими оцінюються рівень ризику суб'єкта первинного фінансового моніторингу бути використаним з метою легалізації (відмивання) доходів, одержаних злочинним шляхом, або фінансування тероризму : Наказ Міністерства фінансів України від 05.03.2012 № 325 [Електронний ресурс] / Веб-сайт Верховної Ради України. – 2013. – Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0435-1>.

Надійшла до редколегії 30.09.2013

УДК 005.5:343.9.02

Система управління та моніторингу кредитних операцій як інструментарій протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом / Г. О. Маркарян // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 62 (1035). – С. 53–60. – Бібліогр.: 7 нав.

Предложен инструментарий противодействия легализации доходов, полученных преступным путем, основанный на методологии системного анализа и связи с функциональными особенностями системы управления кредитованием. Проведен анализ финансового мониторинга и банковской деятельности, представлена структура системы управления и мониторинга кредитных операций, сформулированы критерии принятия решений, разработано программное обеспечение.

Ключевые слова: система управления, информационные технологии, легализация доходов, финансовый мониторинг, кредитно-финансовая деятельность.

We propose a tool of counteracting of the legalization of incomes, received by criminal way, based on the methodology of system analysis and communication with the functional features of the control system of crediting. The analysis of financial monitoring and of banking activities is carried out, the structure of a control system and of a monitoring of credit operations is offered, the criteria for decision-making are formulated, software is created.

Keywords: control system, information technologies, Money Laundering, financial monitoring, credit and financial activity.

С. П. ЕВСЕЕВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доц. кафедры ИС ХНЭУ, Харьков;

О. Г. КОРОЛЬ, аспирант, преподаватель кафедры ИС ХНЭУ, Харьков

ПОРТАТИВНЫЕ СРЕДСТВА КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассматриваются основные требования, выдвигаемые к аппаратно-программным средствам защиты конфиденциальных данных, проводится сравнительный анализ основных функций портативных аппаратных средств защиты информации категории USB флеш-накопители.

Ключевые слова: конфиденциальные данные, программно-аппаратные средства защиты, USB флеш-накопители.

Постановка задачи. Информация всегда имела стоимость, а сегодня, когда она консолидировано хранится и автоматически обрабатывается, ее стоимость стремительно возрастает. В настоящее время практически каждый человек, работая с информационными технологиями, имеет потребность в защите конфиденциальной информации. Это могут быть как финансовые отчеты, так и конструкторские документы, планы развития предприятия или сведения о корпоративных клиентах, логины и пароли к различным корпоративным или on-line сервисам, не говоря уже о ключах электронной цифровой подписи, в том числе, к системам «клиент-банк». Такая информация уязвима к угрозам разглашения и нуждается в надежной защите от несанкционированного доступа.

Целью статьи является анализ возможностей программно-аппаратных портативных средств обеспечения конфиденциальности информации и определение основных требований, выдвигаемых к функциям средств защиты конфиденциальных данных на примере портативных аппаратных средств защиты информации категории USB флеш-накопители.

Анализ источников угроз конфиденциальности персональных данных. Необходимость обеспечения безопасности персональных данных в наше время – объективная реальность. Кража персональных данных может нанести правообладателю ощутимый материальный ущерб, если речь идет о кредитных картах или информации о сбережениях в банке. Злоумышленники, обладающие достаточными техническими знаниями, похищают реквизиты банковских карт или имитируют сайты финансовых учреждений.

На самом деле зачастую даже трудно установить источник утечки персональных данных (ПД) вследствие высокой информатизации современного общества, основные средства проникновения и кражи представлены на рис. 1.



Рис. 1 – Основные средства проникновения и кражи персональных данных

Кража персональных данных может нанести правообладателю ощутимый материальный ущерб, если речь идет о кредитных картах или информации о сбережениях в банке. Злоумышленники, обладающие достаточными техническими знаниями, похищают реквизиты банковских карт (скиминг) или имитируют сайты финансовых учреждений, чтобы заставить пользователя предоставить свою личную информацию (фишинг). На практике, когда обнаружены уже последствия утечки информации, бывает очень трудно установить источник этой утечки, вследствие высокой информатизации современного общества.

Под угрозами безопасности ПД при их обработке в информационной системе ПД (ИСПД) понимается совокупность условий и факторов, создающих опасность несанкционированного, в том числе случайного, доступа к персональным данным, результатом которого может стать уничтожение, изменение, блокирование, копирование, распространение персональных данных, а также иных несанкционированных действий при их обработке в информационной системе персональных данных. Классификация угроз безопасности персональных данных представлена на рис. 2 [1, 2].



Рис. 2 – Классификация угроз безопасности персональных данных

В связи с повсеместным развитием Интернета наиболее часто атаки производятся с использованием уязвимостей протоколов сетевого взаимодействия, основные виды атак представлены на рис. 3.

Проведенный анализ показал, что возросшие технические возможности по сбору и обработке персональной информации, развитие средств электронной коммерции и социальных сетей делают необходимым принятие мер по защите персональных данных. Кража персональных данных может нанести правообладателю ощутимый материальный ущерб, если речь идет о кредитных картах, банковских счетах или информации о сбережениях в банках.

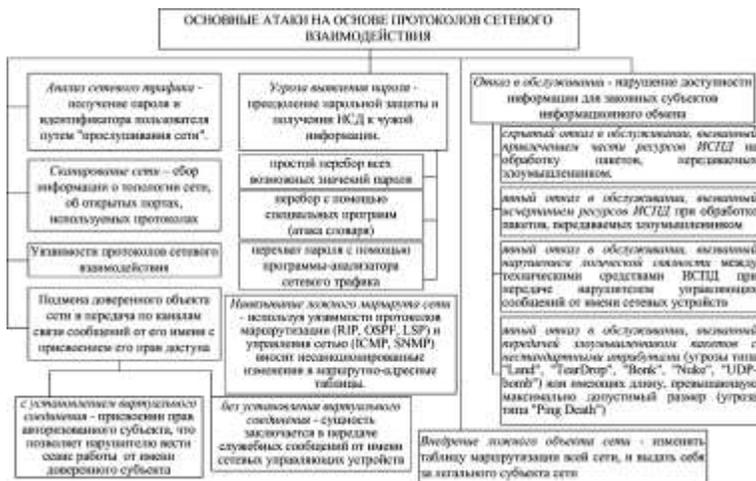


Рис. 3 – Основные виды атак с использованием уязвимостей протоколов сетевого взаимодействия

Классификация элементов комплексной системы защиты конфиденциальных данных. Для обеспечения защиты конфиденциальных (персональных) данных, выделяются три основных типа мер по обеспечению безопасности: организационные, технические и правовые. Их классификация представлена на рис. 4.



Рис. 4 – Основные типы мер по защите персональных данных

Важной составляющей комплексной защиты персональных данных являются технические средства. Условно, их можно разделить на три основных вида (по способу реализации): аппаратные, программные и программно-аппаратные. При этом исключительно аппаратные средства защиты сегодня встречаются очень редко, т.к. для гибкой интеграции аппаратного средства защиты (особенно многоцелевого) в современную ИТ-систему всё равно необходимо специализированное программное обеспечение.

К аппаратным средствам относят комплексы электронных устройств, которые обеспечивают защиту конфиденциальных данных на аппаратном уровне, т.е. реализация защиты осуществляется ресурсами самого периферийного устройства, а не рабочей станции и её программного обеспечения, включая операционную систему (ОС). Программные средства защиты – это совокупность программных компонентов, как правило, реализующих криптографические алгоритмы и обеспечивающих разграничение доступа и предотвращение угроз несанкционированного использования и модификации информации.

На практике, программные средства незаменимы при построении защиты баз персональных данных и систем обработки информации различного назначения, и сложности. Вместе с тем, программные средства, по своей природе, подвержены угрозам взлома и НСД.

Аппаратно-программные средства как правило обеспечивают комплексную защиту данных, что существенно снижает возможность несанкционированного доступа до защищенной области данных, однако, их разработка и реализация требует дополнительных экономических затрат, что существенно увеличивает их стоимость по сравнению с программными средствами.

Примерами реализации аппаратно-программных средств, криптографической защиты конфиденциальной информации являются Armorino (Украина) и InfoWatch CryptoStorage (Россия). Сравнительная характеристика Armorino и InfoWatch Crypto-Storage представлена в таблице.

Решения представлены в виде флеш-накопителей с интегрированным программным обеспечением и предназначены для защищённого хранения и обработки конфиденциальных данных. Данные устройства – наиболее универсальны в обеспечении защиты персональных данных, в случаях, использования и распространения БПД на разных компьютерах.

Разработанная система группой компаний InfoWatch предназначена для защиты конфиденциальной информации пользователя от несанкционированного доступа и предотвращения утечки данных при сохранении операционной системой служебной [3].

Система предоставляет возможность: создавать отдельные защищенные папки в файловой системе NTFS для размещения конфиденциальной информации; создавать виртуальные защищенные диски (защищенные контейнеры) для размещения конфиденциальной информации; защитить всю

информацию на логических разделах жесткого диска, включая системные и загрузочные, на Flash-накопителях, USB устройствах хранения и прочих устройствах класса MassStorage.

Сравнительная характеристика Armorino и InfoWatch Crypto-Storage

Характеристики	Armorino	InfoWatch CryptoStorage
1	2	3
Несколько разделов, с различным типом доступа.	+	-
Аппаратное шифрование данных стойкими алгоритмами.	+	+
Устойчивость к ошибкам в процессе шифрования	+	+
Поддержка нескольких учетных записей пользователей и возможность управления ними	+	-
Наличие различных ролей доступа таких как "Пользователь", "Администратор"	+	-
Поддержка работы со всеми типами и версиями ОС	+	+
Удобство и простота в использовании	+	+
Безвозвратное удаление	-	+
Удалённое восстановление данных	-	+

Защита системного диска обеспечивает конфиденциальность: содержимого оперативной памяти, сохраняемого на диске при переходе в спящий (hi-bername) режим; данных файла дампа памяти (crash dump), сохраняемого на диске в экстренных ситуациях; информации из временных файлов и файлов подкачки; информации на диске при неполном уничтожении файлов пользователя.

Для защиты информации применяется механизм прозрачного шифрования на основе блочно-симметричного алгоритма AES [3].

Системой обеспечивается: разграничение доступа к защищенной информации на основе паролей пользователей; многопользовательский доступ к защищаемой информации; возможность размещения одних защищенных объектов внутри других с произвольной глубиной вложенности; предотвращение случайного или умышленного уничтожения защищенных объектов посредством ограничения доступа к этим объектам; работа с защищенными контейнерами и папками, расположенными как на компьютере пользователя, так и на ресурсах локальной сети; возможность переноса защищенных объектов вместе с физическим носителем, на котором объекты расположены, на другой компьютер, на котором также установлена Система. При этом возможность работы с объектами не утрачивается; гарантированное удаление файлов и папок [3].

Проведенный анализ основных функций позволяет выделить недостатки системы:

- отсутствие счетчика попыток авторизации пользователя позволяет злоумышленнику осуществлять “неограниченное” количество попыток подбора ключевых последовательностей. Ключевые последовательности формируются пользователем и их “надежность” зависит от компетентности пользователя в области защиты данных;
- отсутствие возможности, в случае утраты всех паролей доступа к защищенному объекту, восстановить содержимое объекта, может привести к потере конфиденциальной информации;
- невозможность администрирования защищенных областей не обеспечивает защиту от инсайдерских атак на защищенные области других пользователей;
- отсутствует возможность надежной аутентификации пользователей Windows на основе генерации случайного пароля;
- отсутствие возможности использования портативного программного обеспечения требует дополнительных затрат на защиту от вирусных атак защищенных областей системы;
- отсутствие возможности автоматического обновления ПО.

Разработанный компанией Microsoft Technologies защищенный USB флеш-накопитель “Арморино” позволяет эффективно противодействовать угрозам безопасности, возникающим в корпоративном секторе, и обеспечивает безопасное хранение, обработку и обмен конфиденциальной информации между разными рабочими станциями на платформе Windows. Для обеспечения конфиденциальности информации, устройство применяет высоконадежный блочный симметричный шифр AES-256 и аутентификацию авторизованных пользователей с помощью паролей, количество неудачных попыток аутентификации ограничено. “Прозрачное” шифрование и проверка паролей реализованы непосредственно в аппаратном обеспечении, позволяя достигнуть высокого уровня защиты без потери быстродействия [1–3]. Дополнительно, этот накопитель может применяться для безопасного хранения некоторого критического программного обеспечения, которое может быть запущено непосредственно с накопителя на любой рабочей станции Windows (“портативное” программное обеспечение), что позволяет в некоторых случаях повысить степень защиты от вредоносного программного обеспечения.

USB флеш-накопитель “Арморино” вводит гибкую систему управления полномочиями и поддерживает несколько ролей пользователей с разными правами доступа. Для авторизации в рамках любой роли, имеющей привилегированный доступ (“Ограниченный пользователь”, “Привилегированный пользователь” или “Администратор”), необходимо ввести соответствующий пароль. Реализованная система позволяет создать

единую корпоративную политику безопасности, и одновременно решить возможные угрозы, связанные с утратой (забыванием) паролей пользователями и, как следствие, потерей критической информации. Устройство “Арморино” может применяться для надежной аутентификации пользователей Windows. Для этого на хост-систему устанавливается провайдер аутентификации (Windows Logon), позволяющий выполнять вход в систему, подключив устройство и выполнив аутентификацию на пароле “Пользователя” или “Администратора” устройства. Таким образом, пользователю достаточно запомнить лишь пароль доступа к устройству и иметь само устройство.

“Арморино” поддерживает до четырех разделов на одном USB-устройстве:

CD-ROM – раздел предназначен для хранения и запуска программного обеспечения управления устройством. Для считывания информации и запуска программных приложений аутентификация не нужна.

Общий (Public) – раздел предназначен для временного хранения и переноса “открытой” информации, не требующей надежной защиты от разглашения.

Личный (Private) – раздел предназначен для хранения и переноса конфиденциальной информации. Для доступа к этому разделу требуется аутентификация. Все данные, загруженные на этот раздел, хранятся во флеш-памяти устройства в зашифрованном виде.

Скрытый (Hidden) – раздел может использоваться для хранения конфиденциальной информации, требующей особенно тщательной защиты, в том числе в условиях угрозы присутствия на рабочей станции вредоносного ПО. Для доступа к этому разделу требуется аутентификация. Все данные, загруженные на этот раздел, хранятся во флеш-памяти устройства в зашифрованном виде.

Устройство может быть использовано четырьмя классами пользователей в соответствии с уровнем привилегий:

Гость – пользователь без привилегий (анонимный пользователь), может считывать информацию и запускать на выполнение программное обеспечение с CD ROM раздела, а так же считывать/записывать информацию на Общий раздел. Аутентификация не требуется;

Ограниченный Пользователь – оператор получает этот уровень полномочий после успешной аутентификации на пароле “Ограниченного Пользователя”. Ограниченный Пользователь имеет все права Гостя, а также доступ к защищенной информации на Личном разделе. Разрешение записи информации на Личный и Общий разделы зависит от текущего состояния флагов «Защищен от записи» этих разделов и полномочий, предоставленных Ограниченному Пользователю;

Уполномоченный Пользователь – оператор получает этот уровень полномочий после успешной аутентификации на пароле “Уполномоченного

Пользователя”. Уполномоченный Пользователь имеет все права Ограниченного Пользователя, а также доступ к защищенной информации на Защищенном разделе. Разрешение записи информации на Личный и Общий разделы зависит от текущего состояния флагов “Защищен от записи” этих разделов и полномочий, предоставленных Уполномоченному Пользователю;

Администратор – оператор получает этот уровень полномочий после успешной аутентификации на пароле Администратора. Уровень полномочий Администратора дает все права Уполномоченного Пользователя и добавляет к ним право конфигурирования всех параметров безопасности накопителя [4].

Для сброса текущего уровня полномочий, с которым выполнена авторизация, необходимо сделать Выход для соответствующего профиля. Устройство “Арморино” поддерживает возможность корпоративной настройки и дальнейшего менеджмента устройства на Корпоративной консоли администрирования. Корпоративная консоль позволяет выполнять следующие функции администрирования устройства:

- начальную инициализацию устройства, включая установку пароля “Администратора”, политики безопасности паролей и возможность дистанционного восстановления устройства;
- изменение конфигурации устройства (тип дистанционного восстановления и политика паролей);
- восстановление устройства без потери защищенных данных (при непосредственном подключении);
- вычисление “одноразового пароля” для дистанционного восстановления устройства без потери защищенных данных;
- “сбрасывание” ключа защиты CD-ROM раздела;
- сервисные функции.

Дополнительно, устройство позволяет создавать на его “скрытом” разделе “скрытые защищенные хранилища”. Каждое такое хранилище ассоциируется с некоторым сертифицированным приложением, которое создает и использует такое хранилище для хранения собственных секретных данных (в большинстве случаев, ключевой информации).

Создавать и использовать “скрытые защищенные хранилища” может лишь приложение сертифицированное компанией-разработчиком.

Доступ к данным скрытого хранилища возможен лишь после аутентификации “Администратора” или “Уполномоченного пользователя”. Права доступа “Пользователя” к хранилищу приложения могут быть ограничены и определяются вовремя его создания. Накопители семейства “Арморино” позволяют изменить концепцию обеспечения конфиденциальности от “защиты отдельных файлов” до “портативного защищенного офиса в кармане рубашки” [4].

Устройство Armorigino может применяться для надежной аутентификации пользователей Windows. Для этого в хост систему устанавливается провайдер

аутентификации (Windows Logon), позволяющий выполнять вход в систему, подключив устройство и выполнив аутентификацию на пароле Пользователя или Администратора устройства. Таким образом, пользователю достаточно запомнить только пароль доступа к устройству и иметь само устройство. В сравнении с простой парольной аутентификацией Windows, применение устройства ArmoRino позволяет значительно повысить уровень защиты учетных записей пользователей при сохранении удобства аутентификации. Это достигается благодаря установке случайного пароля для учетной записи Windows, а также блокированию устройства после исчерпания ограниченного количества (не более 15) неудачных попыток аутентификации на нем. Программная среда ArmoRino поддерживает расширение стандартных возможностей устройства благодаря дополнительному программному обеспечению. Внешнее ПО может использовать ArmoRino в качестве защищенного хранилища ключевой и другой информации. Для этого достаточно интегрировать во внешнее ПО Plugin библиотеку для работы с ArmoRino. Устройство поддерживает тесную интеграцию с “PortableApps.com”, что позволяет непосредственно из основного интерфейса программы выполнять установку указанного “портативного” ПО на Личный раздел устройства. “Портативное” ПО, установленное на Личном разделе, все свои данные хранит исключительно на Личном разделе, что обеспечивает необходимый уровень конфиденциальности. Особенно это актуально для почтовых клиентов, браузеров и различных чат и voice-клиентов, а также другого коммуникационного ПО [4].

Выводы. Проведенный анализ технических средств защиты конфиденциальных данных показал, что в условиях рынка информационных технологий России и Украины следует отдавать предпочтение аппаратно-программным средствам защиты информации, поскольку программные средства часто подвергаются взлому ПО, что приводит к возможности изменить уникальность его кода и использованию в личных целях. Таким образом, программные средства не в полной мере могут обеспечить достаточный уровень защиты конфиденциальных данных. Разработанный украинской компанией “Микрокрипт Текнолоджис” защищенный портативный USB флеш-накопитель удовлетворяет современным требованиям по обеспечению комплексной защиты данных.

Список литературы: 1. *Евсеев С. П.* Портативные средства обеспечения конфиденциальности информации / *С. П. Евсеев, С. А. Головашич, О. Г. Король* // Научно-технічний журнал «Сучасний захист інформації». № 2. – 2012. – С. 43–52. 2. Защита персональных данных. [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу : <http://www.iso27000.ru/chitalnyi-zai/zaschita-personalnyh-dannyh/zaschita-personalnyh-dannyh> [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу : http://www.infowatch.ru/sites/default/files/products/cs/criptostorage_user_guide_ru.pdf. 3. CryptoStorage 2.1. Руководство пользователя 4. Руководство пользователя “Защищенный USB флеш-накопитель-ArmoRino”.

Надійшла до редколегії 05.02.2013

Портативные средства криптографической защиты конфиденциальных данных / С. П. Евсеев, О. Г. Король // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 61–69. – Бібліогр.: 7 назв.

Розглядаються основні вимоги, висунуті до апаратно-програмних засобів захисту конфіденційних даних, проводиться порівняльний аналіз основних функцій портативних апаратних засобів захисту інформації категорії USB флеш- накопичувачі.

Ключові слова: персональні дані, захист персональних даних, програмно-апаратні засоби захисту.

The main demands made to the hardware and software tools for protecting sensitive data, a comparative analysis of the main features of portable hardware data protection category USB flash drives.

Keywords: sensitive data, software and hardware protection, USB flash drives.

И. П. ГАМАЮН, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
О. Н. БЕЗМЕНОВА, асп., НТУ «ХПИ»

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ И ГРУППИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ

Статья посвящена рассмотрению особенностей некоторых из существующих методов классификации объектов и группировки параметров. Рассмотрены неиерархические и иерархические методы, выполнено их сопоставление.

Ключевые слова: классификация объектов, группировка параметров, неиерархические методы, иерархические методы, алгоритм, сопоставление.

Введение. Несмотря на широкое применение методов группировки параметров и классификации объектов (кластерного анализа) общепринятого определения групп и классов нет [1]. Большинство разработчиков этих методов интуитивно понимают то, что элементы одной группы (или одного класса) должны быть ближе друг к другу, чем к другим элементам, однако особенности этого отношения в общем случае явно указать нельзя.

Постановки задач группировки параметров и классификации объектов обладают несомненным сходством. Различие сводится, в основном, к методике установления отношения близости между рассматриваемыми элементами (параметрами либо объектами): в одном случае говорят о связи между элементами, а в другом о близости в прямом смысле этого слова либо о сходстве.

В работе [2] дана одна из первых формулировок задачи группировки; однако методы группировки параметров и классификации наблюдений полу-

чили развитие несколько позже. Разработано довольно много таких методов и существуют хорошие их обзоры [3–11].

При рассмотрении и анализе этих методов будем исходить из общепринятой их классификации на иерархические методы, относя к иерархическим и те методы, в которых формирование групп осуществляется последовательно с автоматическим установлением их количества. Методы, в которых просмотр каждого из группируемых элементов осуществляется только один раз, будем называть однократными.

1. Неиерархические методы группировки параметров и классификация наблюдений

Довольно распространенными являются методы, основанные на использовании эталонов, в качестве которых при классификации объектов чаще всего выступают центры тяжести классов в пространстве параметров. Одним из первых среди подобных методов является алгоритм, описанный в работе [10]. Алгоритм обеспечивает последовательное формирование классов и состоит в следующем. Первый объект принимается в качестве центра тяжести первого класса. Остальные объекты последовательно соотносятся с центрами тяжести классов, сформированных к моменту рассмотрения объекта. Если объект отстоит от центра тяжести некоторого класса на расстоянии, меньшем порогового значения, то он включается в этот класс и центр тяжести пересчитывается. Если же объект не будет включен ни в один из классов, то он образует новый класс. Существенными недостатками метода являются, во-первых, необходимость задания порогового значения и, во-вторых, зависимость результатов классификации от порядка просмотра объектов. Если условно ввести некоторое пространство объектов, в котором i -я координатная ось указывает нормирование значения признаков, зафиксированные у i -го объекта, то этот же метод может быть применен и при группировке параметров. Похожие методы описываются в работе [11], где, кроме того, проводится исследование некоторых их свойств.

Сходным с приведенным выше алгоритмом является так называемый метод K -средних, предложенный в статье [12] и получивший достаточно широкое распространение [7, 8, 13–17]. Его отличие заключается в том, что в нем на начальном этапе берется K объектов, объявляемых центрами классов, и далее каждый из оставшихся объектов включается в тот класс, к центру которого он ближе. Очевидно, первоначальный выбор центров классов и порядок последующего просмотра элементов существенно влияют на получаемое решение.

Развитием метода K -средних является метод, получивший название ISODATA [18]. Он состоит в том, что, задавшись центрами K классов, размещают все объекты по классам в соответствии с внутриклассовым критерием минимальности. После отнесения всех элементов центры пересматриваются, и процесс повторяется до тех пор, пока не прекратится улучшение критерия.

Имеется ряд алгоритмов, в основу которых положены идеи методов *K*-средних и ISODATA. Так в работах [19, 20] предлагается циклически повторять метод *K*-средних, беря на каждой итерации в качестве центров классов центры тяжести, полученные по окончании предыдущей итерации, до тех пор, пока на двух соседних итерациях не будут получены близкие центры для всех классов. В работе [21] вместо центров тяжести вводятся ядра классов, являющиеся некоторыми подмножествами соответствующих классов. При разбиении множества объектов на классы исходят из случайно сформированного набора ядер с заданным числом элементов в каждом из них. Получение разбиения осуществляется отнесением элементов к тем или иным классам в зависимости от их связи с элементами ядер классов. После того, как все элементы будут классифицированы, для каждого класса формируется новое ядро посредством выбора заданного числа элементов, наиболее связанных со всеми элементами класса. Процедура повторяется до тех пор, пока не прекратится улучшение выбранного критерия оптимальности.

Существуют методы, в которых задается форма классов объектов в пространстве параметров. Так, например, в работе [22] предлагается каждый кластер окружать гиперэллипсоидом. Однако в этом случае классификация будет качественной только в случае хорошей делимости и достаточной плотности классов.

Задача группировки параметров может решаться на графах в предположении, что вершины графа соответствуют параметрам, а ребра нагружены весами, равными значениям показателя степени связи между параметрами. Имеющий несколько модификаций [23–25] метод корреляционных плеяд является одним из первых методов автоматической классификации. В корреляционной матрице, оценивающей степень связи между параметрами, элементы, по модулю меньше некоторого порогового значения, заменяются нулями, а остальные – единицами. В результате получается матрица смежности графа, число компонент связности которого (названных корреляционными плеядами) и их типология характеризуют структуру корреляционных связей между параметрами. Задаваясь различными пороговыми значениями, можно найти такой порог, при котором граф становится несвязным. Компоненты связности будут характеризовать разбиение множества параметров. Для выделения компонент связности возможно использование алгоритмов, приведенных в работах [26, 27]. Хотя метод корреляционных плеяд и позволяет автоматически установить количество групп, возможность его применения ограничивается необходимостью задания порогового значения степени связи.

Еще один подход к классификации с применением методов теории графов реализован посредством алгоритмов, основанных на построении кратчайшего незамкнутого пути между точками-объектами в пространстве параметров или точками-параметрами в пространстве наблюдений [28]. Идея метода состоит в переборе всех вариантов разрыва кратчайшего незамкнутого

пути с отысканием варианта, обеспечивающего экстремум некоторому критерию качества.

Аналогичные предпосылки заложены в методе, состоящем в построении дерева, являющегося минимальным покрытием исходного множества точек [29, 30]. В работе [31] задача классификации сведена к проблеме раскрашивания графа, а в статье [32] дано описание и сравнение некоторых графовых алгоритмов.

Недостатком графовых алгоритмов является их переборный характер, ведущий к значительным временным затратам.

Как это уже отмечалось выше, для решения рассматриваемой задачи чаще всего используются либо алгоритмы, максимизирующие расстояние между классами, либо алгоритмы, максимизирующие корреляционные связи внутри групп. Существуют и другие меры связи, причем их перечень довольно велик [3, 12, 33, 34]. Достаточно широкое применение получил метод потенциальных функций, основы которого изложены, например, в работах [35, 36], а в статье [37], по утверждению ее авторов, впервые дано математическое обоснование.

В заключение отметим, что иногда требуется проводить как группировку параметров, так и классификацию объектов [38–40]. При решении подобных задач возможно применение последовательных алгоритмов, в которых на первом этапе выделяются группы близких параметров, а на втором – классы близких объектов (или наоборот), либо параллельных алгоритмов, основанных на аппроксимации матрицы наблюдений небольшим числом подматриц, которые в общем случае могут пересекаться. Параллельные алгоритмы базируются на введении некоторых функционалов, характеризующих степень приближения матрицы данных системой подматриц.

2. Иерархические методы группировки параметров и классификация объектов

Среди методов и алгоритмов классификации выделяют совокупность методов, характерной чертой которых является следующее: если рассмотреть динамику изменения групп, получаемых на различных итерациях, то будет сформировано дерево, корнем которого является множество всех классифицируемых параметров (либо объектов), а все остальные вершины представляют собой различные группы. Подобные методы, называемые иерархическими, делят на две совокупности – дивизимные и агломеративные. Для первых из них характерно то, что при их применении число групп от итерации к итерации увеличивается за счет разделения некоторых групп, полученных на предыдущей итерации [41]. Пользующиеся большей популярностью в практических применениях агломеративные методы отличаются тем, что в них происходит объединение групп, причем формирование дерева чаще всего не происходит, так как всегда требуется получение более одной группы. Подробнее описание иерархических методов и обсуждение вопросов, связанных с

вычислением меры близости между классами, дано, например, в работе [42], а в работах [43, 44] проведено сравнение различных иерархических методов. В статье [45] сопоставляются иерархические методы и алгоритм ISODATA.

В методе ближайшего соседа, зачастую называемом односвязывающим [46], связь между группами оценивается расстоянием между их ближайшими соседями. Суть агломеративного алгоритма группировки методом ближайшего соседа состоит в том, что, начиная с одноэлементных групп, получают необходимое их количество путем последовательного объединения тех из них, расстояние между которыми наименьшее. На каждом этапе объединяются две группы.

В отличие от односвязывающего метода, в методе самого дальнего соседа, иначе называемом полностью связывающим [46], расстояние между двумя группами определяется по самым удаленным их элементам. Используя тот же алгоритм, что и в односвязывающем методе, можно получить классы в виде гиперсфер. Некоторые свойства процедуры, реализующей эти два типа методов, обсуждаются в работах [47, 48].

Отличие среднесвязывающего метода от двух названных выше состоит в том, что о расстоянии между группами судят по расстоянию между их центрами тяжести (средними) [49].

Все названные выше агломеративные методы своим истоком, пожалуй, имеют метод, в основу которого положено требование минимизации суммы разбросов элементов, принадлежащих выделенным группам, относительно центров соответствующих групп. В этом алгоритме, также начинающем свою работу с одноэлементных групп, на каждой итерации происходит последовательное объединение таких двух групп, для которых достигается минимум разности разбросов объединенной группы и объединяемых [50, 51].

Зачастую задача иерархической классификации решается как задача диагонализации матрицы связи [52–54], состоящая в отыскании такой перестановки строк и столбцов матрицы связи и такого их разбиения, чтобы значения элементов матрицы вне выделенных при этом диагональных блоков в среднем были минимальными (в предположении, что увеличение значения элемента соответствует увеличению степени связи). Решение задачи диагонализации матрицы связи осуществляется с помощью алгоритма, в котором связь между двумя группами оценивается отнесенной к произведению количества элементов в группах сумме показателей степени связи между элементами, принадлежащими различным группам [53].

Более общим является алгоритм, предложенный в работе [55], который хоть и не является, строго говоря, иерархическим, однако основан на использовании иерархического метода. Это циклический алгоритм, состоящий из трех этапов, на первом из которых применяется описанный в работе [53] агломеративный иерархический алгоритм. Второй этап состоит в последовательном перемещении каждого объекта в порядке нумерации в тот класс, для которого введенный показатель качества получает наибольшее положитель-

ное приращение. Процесс прекращается, если любая перестановка любого объекта в любой класс не увеличивает критерия качества. Третий этап алгоритма основан на выполнении введенных в статье условий оптимальности. Те из классов, для которых условия оптимальности не выполняются, разбиваются на одноэлементные классы, после чего процесс повторяется, начиная с первого этапа.

При группировке по r -диаметру [56] используется функция близости между двумя объектами, равная нулю при их совпадении и принимающая тем большие значения, чем в большей степени они удалены. В этом случае используется обычная процедура агломеративной иерархической классификации с объединением двух классов, обладающих минимальным. Под r -диаметром при этом понимается минимальное значение функции близости между объектами O_i, O_j исходного множества, обладающими следующим свойством: для любых двух объектов, принадлежащих объединению, существует содержащая в качестве крайних элементов эти объекты последовательность из элементов исходного множества такая, что функция близости между любыми соседними в этой последовательности объектами не превосходит функции близости для объектов O_i, O_j . Группировка по r -диаметру позволяет добиться компромисса между одно- и полносвязывающим методами, обобщая их и обеспечивая в частных случаях решение задачи согласно каждой из этих процедур.

Сходным является метод, основанный на использовании обобщенных r -клик [57], так как r -диаметр и понятие r -достижимости в r -кликах фактически совпадают. Однако поскольку количество клик в графе возрастает экспоненциально от числа вершин [58], методы группировки по r -диаметру и r -кликам ориентированы на решение NP -полных задач, хотя они могут быть и довольно эффективными в связи с тем, что анализ сложности алгоритмов и задач проводят для наихудшего случая, который не всегда отражает то, что может встретиться на практике.

Выводы. Анализ рассмотренных методов свидетельствует о необходимости проведения исследований, направленных на разработку методов классификации, позволяющих осуществлять качественную диагностику состояния. Довольно проработанными являются методы классификации объектов, описываемых количественными параметрами. Для качественных же параметров эти вопросы, включая меры связи, проработаны недостаточно.

Список литературы: 1. Сокал Р. Р. Кластер-анализ и классификация: предпосылки и основные направления / Р. Р. Сокал // Классификация и кластер / ред. Дж. Вэн Райзин. – М. : Мир, 1980. – С. 7–19. 2. Малиновский Л. Г. Классификация объектов средствами дискриминантного анализа / Л. Г. Малиновский. – М. : Наука, 1979. – 260 с. 3. Статистические методы анализа информации в социальных исследованиях. – М. : Наука, 1979. – 319 с. 4. Гуд И. Дж. Ботриология ботриологии / И. Дж. Гуд / Классификация и кластер / ред. Дж. Вэн Райзин. – М. : Мир. – 1980. – С. 66–89. 5. Дюран Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, И. Одедл – М. : Статистика, 1977. – 128 с.

- 6. Cormack R. M.** Classification: an overview / *R. M. Cormack* // *Anal. donnés et inf. Cours. commis. comun. eur.*, Fontainebleau, 1979. – Rocquencourt. – 1980. – P. 125–147. **7. Kennedy J. N.** A review of some cluster analysis methods / *J. N. Kennedy* // *AIEE Trans.* – 1973. – V. 6. – № 3. – P. 216–227.
- 8. Дуда Р.** Распознавание образов и анализ сцен / *Р. Дуда, П. Харт.* – М.: Мир, 1976. – 512 с.
- 9. Фукунага К.** Введение в статистическую теорию распознавания образов / *К. Фукунага.* – М.: Наука, 1976. – 368 с.
- 10. Себастьян Г. С.** Процессы принятия решений при распознавании образов / *Г. С. Себастьян.* – К.: Техника, 1965. – 151 с.
- 11. Graff-Jaccottet M.** Aspects mathématiques de trois méthodes de classification heuristique / *M. Graff-Jaccottet* // *Data Anal. and Inf./ Proc 2nd Int. Symp., Versailles, 1979.* – Amsterdam. – 1980. – P. 613–618.
- 12. Mac Queen J. B.** Some methods for classification and analysis of multivariate observations / *J. B. Mac Queen* // *Proc. 5th Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob., v. 1.* – Berkeley, 1967. – P. 281–298.
- 13. Айвазян А. С.** Классификация многомерных наблюдений / *А. С. Айвазян, З. И. Бежаева, О. В. Староверов.* – М.: Статистика. – 1974. – 210 с.
- 14. Pflug G.** On sequential classification / *G. Pflug* // *COMPSTAT 1976. Proc. Comput. Statist., 2nd Symp., Berlin (West), 1976.* – Wien. – 1976. – P. 105–112.
- 15. Соломон Г.** Зависящие от данных методы кластер-анализа / *Г. Соломон* // *Классификация и кластер* / ред. *Дж. Вэн Райзин.* – М.: Мир, 1980. – С. 129–147.
- 16. Ту Джэ., Гонсалес Р. К.** Принципы распознавания образов / *Дж. Ту, Р. К. Гонсалес.* – М.: Мир, 1978. – 411 с.
- 17. Патрик Э. А.** Основы теории распознавания образов / *Э. А. Патрик.* – М.: Сов. радио, 1980. – 408 с.
- 18. Ball G. H.** ISODATA. An iterative method of multivariate analysis and pattern classification / *G. H. Ball, D. J. Hall* // *1966 IEEE Int. Commun. Conf., Philadelphia / Digest of Techn. Pap.* – N. Y., 1966. – P. 116–117.
- 19. Высоцкая Н. В.** Метод порядковой классификации многомерной социально-экономической информации / *Н. В. Высоцкая.* – Новосибирск: Ин-т экономики и организации промышленного производства СО АН СССР, 1979. – 8 с.
- 20. Миркин В. Г.** Шкалы упорядочения / *В. Г. Миркин, Н. В. Высоцкая [и др.]* // *Моделирование в экономических исследованиях.* – Новосибирск, 1978. – С. 109–113.
- 21. Diday E.** The dynamic clusters methods in nonhierarchical clustering / *E. Diday* // *Int. J. Comput. and Inf. Sci.* – 1973. – V. 2. – № 1. – P. 61–68.
- 22. Kopp B.** Ein neues Verfahren zur Cluster-Analyse / *B. Kopp* // *Biometr. Z.* – 1976. – V. 18. – № 6. – S. 473–476.
- 23. Терентьев П. В.** Метод корреляционных плейд / *П. В. Терентьев* // *Вестн. Ленингр. гос. ун-та.* – № 9. – 1959. – С. 137–141.
- 24. Аркадьев А. Г.** Метод потенциальных функций в теории обучающих машин / *А. Г. Аркадьев, Э. М. Браверман, М. И. Розоноэр.* – М.: Наука, 1970. – 384 с.
- 25. Жуковская В. М., Мучник И. Б.** Факторный анализ в социально-экономических исследованиях / *В. М. Жуковская, И. Б. Мучник.* – М.: Статистика, 1976. – 151 с.
- 26. Warfield J. N.** Binary matrices system modeling / *J. N. Warfield* // *IEEE Trans. Syst., Man., Cybern.* – 1973. – Vol. SMC-3. – № 5. – P. 441–449.
- 27. Steward D. V.** Partitioning and tearing systems of equations / *J. N. Warfield* // *J. SIAM. Numer. Anal.* – 1965. – Vol. 2. – № 2. – P. 345–353.
- 28. Загоруйко Н. Г.** Методы распознавания и их применение / *Н. Г. Загоруйко.* – М.: Сов. радио, 1972. – 237 с.
- 29. Zahn C. T.** Graph-theoretical methods for detecting and describing gestalt clusters / *C. T. Zahn* // *IEEE Trans. Comp.* – 1971. – Vol. 20. – № 1. – P. 68–86.
- 30. Page R. L.** Algorithm 479. A minimal spanning tree clustering method [Z] / *R. L. Page* // *Commun. ACM.* – 1974. – Vol. 17. – № 6. – P. 321–323.
- 31. Hansen P., Delatre M.** Comple-link cluster analysis by graph coloring / *Hansen P., M. Delatre* // *J. Amer. Statist. Assoc.* – 1978. – Vol. 73. – 362. – P. 393–408.
- 32. D. G. Corneil.** A comparison and evaluation of graph theoretical clustering techniques / *D. G. Corneil, M. E. Woodward* // *Infor.* – 1978. – Vol. 16. – № 1. – P. 74–89.
- 33. Житков Г. Н.** Некоторые методы автоматической классификации (обзор) / *Г. Н. Житков* // *Структурные методы опознавания и автоматическое чтение.* – М., 1970. – С. 68–85.
- 34. Pao C. F.** Кластер-анализ в применении к изучению перемешивания рас в популяции людей / *С. Ф. Пао* // *Классификация и кластер* // ред. *Дж. Вэн Райзина.* – М.: Мир, 1980. – С. 149–167.
- 35. Баиширов О. А.** Алгоритмы обучения машин распознаванию зрительных образов, основанные на использовании потенциальных функций / *О. А. Баиширов, Э. М. Браверман, И. Б. Мучник* // *Автоматика и телемеханика.* – 1964. – Т. XXV. – № 5. – С. 692–695.
- 36. Айзерман М. А.** Обучение машин классификации объектов / *М. А. Айзерман, Э. М. Браверман.* – М.: Наука, 1971. – 192 с.
- 37. Vabu C. C.** A not on the potential function algorithm for pattern classification / *C. C. Vabu, Chan Wah-Chun.* // *Int. J. Contr.* – 1971. – Vol. 13. – № 1. – P. 199–200.
- 38. Браверман Э. М.** Лингвистический подход к задаче обработки больших массивов информации / *Э. М. Браверман,*

- Н. Е. Киселева [и др.] // Автоматика и телемеханика. – 1974. – № 11. – С. 73–88. **39.** Авен П. О., Киселева Н. Е., Мучник И. Б. Аппроксимация матрицы данных перекрывающимися блоками / П. О. Авен, Н. Е. Киселева, И. Б. Мучник // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 8. – С. 122–132. **40.** Авен П. О. Метод вторых разностей в параллельных алгоритмах лингвистического анализа / П. О. Авен // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 10. – С. 125–135. **41.** Lee R. C. T. A direct splitting clustering analysis algorithm / R. C. T. Lee // Proc. 3rd Milwaukee Symp. Autom. Comput. and Control. Pap. Symp. Milwaukee, Wisc., 1975. – North Holland, Calif. – 1975. – P. 201–211. **42.** Williams W. T. Hierarchical classificatory methods / W. T. Williams, G. N. Lanc // Statist. Meth. Dig. Comput. – New York e.a. – 1977. – P. 260–295. **43.** Kauiper F. K. Monte-Carlo comparison of sex clustering procedures / F. K. Kauiper, L. A. Fischer // Biometrics. – 1975. – Vol. 31. – № 3. – P. 777–783. **44.** Mojena R. Hierarchical grouping methods and stopping rules: an evaluation / R. Mojena // Comput. J. – 1977. – Vol. 20. – № 4. – P. 359–363. **45.** Strauss D. J. The evaluation of classification techniques / D. J. Strauss // Trab. estadist. y invest. oper. – 1977. – Vol. 23. – № 2–3. – P. 167–183. **46.** Johnson S. C. Hierarchical clustering schemes // Psychometrika / S. C. Johnson. – 1967. – Vol. 32. – № 3. – P. 241–251. **47.** Kopp B. Hierarchical classification. I: single-linkage method / B. Kopp // Biometr. J. – 1978. – Vol. 20. – № 5. – P. 495–501. **48.** Kopp B. Hierarchical classification. II: complete-linkage method / B. Kopp // Biometr. J. – 1978. – Vol. 20. – № 6. – P. 597–602. **49.** King B. F. Step-wise clustering procedures / B. F. King // J. Amer. Statist. Assoc. – 1967. – Vol. 62. – № 317. – P. 86–101. **50.** Ward J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function / J. H. Ward // J. Amer. Statist. Assoc. – 1963. – Vol. 58. – P. 236–244. **51.** Wischart D. An algorithm for hierarchical classifications / D. Wischart // Biometrics. – 1969. – Vol. 25. – № 1. – P. 165–171. **52.** Браверман Э. М. Диагонализация матрицы связи и выявление скрытых факторов / Э. М. Браверман, А. А. Дорофеюк [и др.] // Проблемы расширения возможностей автоматов. – Вып. 1. – М., 1971. – С. 42–69. **53.** Лумельский В. Я. Группировка параметров на основе квадратной матрицы связи / В. Я. Лумельский // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 1. – С. 133–143. **54.** Wodycki W. J. Clustering of correlation matrices: a stepwise procedure / W. J. Wodycki // Can. J. Statist. – 1975. – Vol. 3. – № 2. – P. 249–262. **55.** Куперитох В. Л. К обоснованию одного критерия классификации / В. Л. Куперитох, Миркин Б. Г., В. А. Трофимов // Методы моделирования и обработки информации. – М., 1976. – С. 131–143. **56.** Хьюберт Дж. Экспериментальное сравнение эталонных моделей иерархической группировки по r -диаметру / Дж. Хьюберт, Б. Бейкер // Классификация и кластер / ред. Дж. Вэн Райзин. – М., 1980. – С. 112–128. **57.** Peay E. R. Nonmetric grouping: clusters and cliques / E. R. Peay // Psychometrika. – 1975. – Vol. 40. – № 3. – P. 297–313. **58.** Moon J. W., Mozer L. On cliques in graphs / J. W. Moon, L. Mozer // Isr. J. Math. – 1965. – Vol. 3. – № 1. – P. 23–28.

Надійшла до редколегії 07.02.2013

УДК 658.012

Некоторые методы решения задач классификации объектов и группировки параметров (обзор) / И. П. Гамаюн, О. Н. Безменова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 62 (1035). – С. 70–77. – Бібліогр.: 58 назв.

Стаття присвячена розгляду особливостей деяких з існуючих методів класифікації об'єктів та групування параметрів. Розглянуті неієрархічні та ієрархічні методи, зроблено їх співставлення.

Ключові слова класифікація об'єктів, групування параметрів, неієрархічні методи, ієрархічні методи, алгоритм співставлення.

The paper considers the features of some of the existing methods of classification of objects and grouping options. Considered non-hierarchical and hierarchical methods performed to compare.

Keywords: object classification, the grouping of parameters, non-hierarchical methods, hierarchical methods, the algorithm comparison.

С. В. МИНУХИН, канд. техн. наук, проф. ХНЭУ, Харьков;
М. И. СУХОНОС, программист, ООО «Ди Би Бест Технолоджис»,
Харьков

АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОВ МАСШТАБИРОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА

Предложены алгоритмы масштабирования скоростей параллельных процессоров многопроцессорных систем и вычислительных кластеров, имеющих гомогенную и гетерогенную архитектуру. Разработаны программная архитектура и информационная технология для моделирования работы алгоритмов, использующих различные методы распределения заданий на процессоры, приведены примеры и результаты их экспериментального исследования, подтверждающие их эффективность для построения энергоэффективных расписаний выполнения заданий с директивными сроками выполнения в многопроцессорных системах и вычислительных кластерах.

Ключевые слова: процессор, скорость, задание, директивный срок, энергопотребление, длительность, плотность задания, сортировка, загрузка.

Введение. Экономия потребления электроэнергии является важнейшей задачей при разработке и использовании современных процессоров в мобильных устройствах с одноядерными процессорами, серверных фермах и современных ноутбуках с многоядерными процессорами. Оптимизация работы вычислительных кластеров, серверов, многопроцессорных систем и отдельных ПК в настоящее время непосредственно связана с решениями, которые позволяют повысить их экономическую эффективность, в частности, на основе методов оптимизации энергопотребления. На алгоритмическом уровне в настоящее время используется два механизма экономии электроэнергии: масштабирование скорости процессоров и режим включения и отключения процессоров: Процессоры таких производителей как Intel и AMD (технологии Intel SpeedStep и AMD PowerNow) могут работать с переменной скоростью, но при этом, чем выше скорость, тем больше их энергопотребление. Основной задачей масштабирования скорости является такой выбор частот для выполнения заданий, который бы позволил построить энергоэффективный график (расписание) их выполнения, уменьшая при этом время обработки и гарантируя определенную услугу – в допустимом расписании должно отсутствовать запаздывание. Второй механизм экономии электроэнергии заключается в том, что когда процессоры находятся в режиме ожидания, они могут быть в определенный момент переведены в маломощное состояние «сна». При этом проблемой является определение промежутка

© С. В. Минухин, М. И. Сухонос, 2013

(интервалов) времени, в которые нужно выключать процессоры, принимая во внимание то, что переход обратно в активный режим (включение) требует дополнительных затрат электроэнергии.

Одной из известных в настоящее время технологий для снижения (или оптимизации) потребления электроэнергии первого из приведенных механизмов является динамическое масштабирование скорости (напряжения и частоты, Dynamic Voltage Frequency Scalling) процессора [1–8], при использовании которой процессор может варьировать скорость динамически в зависимости от его загрузки, определяемой параметрами выполняемых заданий. В работах [6, 8] предложены и исследованы алгоритмы масштабирования скорости для одиночных процессоров, показано, что они позволяют строить допустимые расписания для выполнения заданий с различными директивными сроками, в работе [7] предложены алгоритмы масштабирования для гомогенных многопроцессорных систем и вычислительных кластеров на основе предварительной сортировки заданий по их длительности.

Содержательно алгоритмы масштабирования скоростей параллельных процессоров включают следующие этапы:

распределение заданий по процессорам на основе выбранного метода [3, 4, 7];

построение расписания выполнения заданий на каждом процессоре [1, 6–8].

Основной задачей этапа 1 является определение последовательности распределяемых на процессоры заданий таким образом, чтобы оно гарантировало оптимальное по критерию качества расписание их последующего выполнения. В силу полученных в работе [2] результатов в качестве характеристики задания для такой сортировки используется его плотность, которая фактически определяет возможную скорость выполнения задания, если бы оно решалось в автономном режиме. Сортировка плотностей заданий по убыванию (метод Highest Density First, HDF) [3, 4] является наиболее приемлемой, так как отражает механизм выбора скорости процессора, положенного в основу работы [2], позволяющего строить допустимые (отсутствие запаздывания) расписания. Вместе с тем, необходимо отметить, что выбор метода распределения заданий требует дополнительных исследований, позволяющих получить более близкие к оптимальным результаты планирования, связанные с балансировкой загрузки процессоров.

Цель данного исследования – разработать алгоритмы, программное обеспечение и информационные технологии для моделирования методов масштабирования скоростей параллельных гомогенных и гетерогенных процессоров на основе методов с предварительной сортировкой заданий по определенным критериям, их экспериментальное исследование и сравнительный анализ эффективности.

1. Алгоритмы масштабирования скоростей для гомогенных параллельных процессоров

1.1. Алгоритм на основе метода распределения заданий с директивными сроками с сортировкой по убыванию их длительности

Пусть задания имеют директивные сроки выполнения и представляются в виде $t_i = \{L_i, D_i\}$, где L_i – длительность i -го задания, D_i – директивный срок его выполнения (завершения).

Пусть имеется тестовая последовательность заданий с директивными сроками:

$t_1 = \{1, 2\}, t_2 = \{1, 3\}, t_3 = \{2, 6\}, t_4 = \{1, 8\}, t_5 = \{3, 9\}, t_6 = \{7, 14\}, t_7 = \{5, 16\}, t_8 = \{4, 22\}, t_9 = \{3, 25\}, t_{10} = \{6, 35\}$.

После сортировки заданий по убыванию их длительности получим:

$t_6 = \{7, 14\}, t_{10} = \{6, 35\}, t_7 = \{5, 16\}, t_8 = \{4, 22\}, t_5 = \{3, 9\}, t_9 = \{3, 25\}, t_3 = \{2, 6\}, t_1 = \{1, 2\}, t_2 = \{1, 3\}$.

Распределим задания по процессорам в соответствии со следующим алгоритмом.

Шаг 1. Распределяем задания $t_6 = \{7, 14\}, t_{10} = \{6, 35\}, t_7 = \{5, 16\}$ в порядке убывания их длительности по всем 3 процессорам. Мощность распределяемого множества заданий – 3. В табл. 1–4 в последнем столбце приведены суммарные загрузки каждого из процессоров.

Получаем начальную загрузку процессоров (см. табл. 1):

Таблица 1

Процессор 1	7			7
Процессор 2	6			6
Процессор 3	5			5

Шаг 2. Оставшиеся задания $t_8 = \{4, 22\}, t_5 = \{3, 9\}, t_9 = \{3, 25\}, t_3 = \{2, 6\}, t_1 = \{1, 2\}, t_2 = \{1, 3\}$ распределяем таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их длительности, было распределено на наименее загруженный процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3.

Получаем общую загрузку каждого процессора (см. табл. 2):

Таблица 2

Процессор 1	7	3		10
Процессор 2	6	3		9
Процессор 3	5	4		9

Шаг 3. Оставшиеся задания $t_3 = \{2, 6\}, t_1 = \{1, 2\}, t_2 = \{1, 3\}$ распределяем таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их длительности, было распределено на

наименее загруженный процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3. Получаем общую загрузку для каждого процессора (см. табл. 3):

Таблица 3

Процессор 1	7	3	1	11
Процессор 2	6	3	2	11
Процессор 3	5	4	1	10

Таким образом, после завершения распределения заданий по процессорам получим следующие расписания выполнения заданий и коэффициенты их средней загрузки после сортировки в порядке возрастания их директивных сроков на каждом из трех процессоров (см. табл. 4):

Таблица 4

Процессор 1	0,5	0,57	0,23	0,23
Процессор 2	0,33	0,37	0,25	0,25
Процессор 3	0,125	0,375	0,45	0,45

Для тестовой последовательности заданий коэффициент средней загрузки [6, 7] составляет 0,94, при этом после распределения заданий между параллельными процессорами должно выполняться неравенство:

$$K_{avr} \leq m^* \max K_{avr i} \quad (1)$$

где $\max K_{avr i}$ – максимальный коэффициент средней загрузки для всех процессоров распределённых на них заданий;

K_{avr} – коэффициент средней загрузки для всех заданий исходной последовательности – $0,94 \leq 1,35$.

После завершения процедуры распределения заданий по процессорам задания, распределенные на каждый из процессоров, сортируются в порядке возрастания (не убывания) их директивных сроков с последующим построением расписаний выполнения заданий с использованием алгоритмов масштабирования скоростей для одиночных процессоров [6–8].

1.2. Алгоритм на основе метода распределения заданий с директивными сроками с сортировкой по убыванию их плотности

Для описания работы алгоритма и оценки результатов его работы на гомогенных параллельных процессорах используем тестовую последовательность заданий, рассмотренную в п. 1.1:

Без потери общности результатов и для упрощения понимания сути работы алгоритмов выберем количество процессоров равным 3. Отметим, что для корректной работы алгоритмов масштабирования задания отсортированы по возрастанию их директивных сроков.

Рассчитаем плотности заданий d_i для исходной последовательности: $d_1=0,5, d_2=0,5, d_3=0,5, d_4=0,25, d_5=0,75, d_6=1,15, d_7=5, d_8=2, d_9=0,5, d_{10}=2$.

Отсортируем задания по убыванию (не возрастанию) их плотностей:

$d_7=5, d_8=2, d_{10}=2, d_6=1,15, d_5=0,75, d_1=0,5, d_2=0,5, d_3=0,5, d_9=0,5, d_4=0,25$.

Отметим, что если директивные сроки заданий совпадают, то в начальном расписании сначала располагается задание с наименьшим директивным сроком выполнения. Далее реализуется следующий алгоритм.

Шаг 1. Распределяем задания в порядке убывания их плотности по всем 3 процессорам. Мощность распределяемого множества заданий – 3. В табл. 5–7 в последнем столбце приведены суммарные загрузки каждого из процессоров.

Получаем начальную загрузку каждого процессора (см. табл. 5):

Таблица 5

Процессор 1	5			5
Процессор 2	2			2
Процессор 3	2			2

Шаг 2. Оставшиеся задания $d_6=1,15, d_5=0,75, d_1=0,5, d_2=0,5, d_3=0,5, d_9=0,5, d_4=0,25$ распределим таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их плотности, было назначено на наименее загруженный процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3.

Получаем общую загрузку для каждого процессора (см. табл. 6):

Таблица 6

Процессор 1	5	0,5		5,5
Процессор 2	2	1,15		3,15
Процессор 3	2	0,75		2,75

Шаг 3. Оставшиеся задания $d_2=0,5, d_3=0,5, d_9=0,5, d_4=0,25$ распределяем таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их плотности, было распределено на наименее загруженный процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3.

Получаем общую загрузку для каждого процессора (см. табл. 7).

Таблица 7

Процессор 1	5	0,5	0,5	6
Процессор 2	2	1,15	0,5	3,65
Процессор 3	2	0,75	0,5	3,35

Упорядочим полученные расписания по возрастанию директивных сроков выполнения заданий (см. табл. 8).

Таблица 8

Процессор 1	d_1	d_3	d_7	
Процессор 2	d_2	d_6	d_8	
Процессор 3	d_5	d_9	d_{10}	

Рассчитаем коэффициенты средней загрузки процессоров для полученных расписаний выполнения распределенных на них заданий (см. табл. 9).

Таблица 9

Процессор 1	0,5	0,5	0,5	0,5
Процессор 2	0,33	0,57	0,54	0,54
Процессор 3	0,33	0,24	0,34	0,34

Для тестовой последовательности заданий коэффициент средней загрузки составляет 0,94, при этом после распределения заданий между параллельными процессорами выполняется неравенство (1) – $0,94 \leq 1,62$.

После завершения процедуры распределения заданий по процессорам те задания, которые были распределены на каждый из процессоров, сортируются в порядке возрастания (не убывания) их директивных сроков с последующим построением расписаний выполнения заданий с использованием алгоритмов масштабирования скоростей для одиночных процессоров [6–8].

2. Алгоритмы масштабирования скоростей для гетерогенных параллельных процессоров

Для гетерогенной многопроцессорной системы задача масштабирования скорости процессоров может быть решена следующим образом: для известных скоростей m процессоров необходимо:

выполнить нормализацию скоростей каждого из m процессоров по отношению к максимальной скорости процессора из их множества;

учитывая, что время выполнения задания t_i на процессоре обратно пропорционально его скорости s_i , т.е.

$$\frac{t_k}{t_l} = \frac{s_l}{s_k},$$

где $s_l > s_k$, $t_k > t_l$, получаем, что время выполнения задания t^* на любом процессоре, имеющем скорость s_k , по отношению ко времени выполнения задания на процессоре с максимальной скоростью s_{max} определяется по формуле:

$$t_i^* = \frac{t_i}{\frac{S_k}{S_{\max}}} = t_i \frac{S_{\max}}{S_k}.$$

2.1. Алгоритм на основе метода распределения заданий с директивными сроками с сортировкой по убыванию их плотности (HDF)

Для описания работы алгоритма и оценки результатов его работы на гетерогенных параллельных процессорах используем следующую тестовую последовательность: $t_1 = \{1, 2\}$, $t_2 = \{1, 3\}$, $t_3 = \{2, 6\}$, $t_4 = \{1, 8\}$, $t_5 = \{3, 9\}$, $t_6 = \{7, 14\}$, $t_7 = \{5, 16\}$, $t_8 = \{4, 22\}$, $t_9 = \{3, 25\}$, $t_{10} = \{6, 35\}$.

Без потери общности полученных результатов и для упрощения понимания работы алгоритмов выберем количество процессоров равным 3. Отметим, что для корректной работы алгоритмов масштабирования задания отсортированы по возрастанию их директивных сроков. Рассчитаем плотности заданий для исходной последовательности и отсортируем задания по убыванию (не возрастанию) их плотностей (см. п.1.2): $d_7=5$, $d_8=2$, $d_{10}=2$, $d_6=1,15$, $d_5=0,75$, $d_1=0,5$, $d_2=0,5$, $d_3=0,5$, $d_9=0,5$, $d_4=0,25$. Отметим, что если директивные сроки заданий совпадают, то в начальном расписании сначала располагается задание с наименьшим директивным сроком выполнения.

Шаг 1. Распределяем задания в порядке убывания их плотности по всем 3-ем процессорам с учетом их разных скоростей. Мощность распределяемого множества заданий – 3. В табл. 10–12 в последнем столбце приведены суммарные значения плотностей заданий, распределенных на каждый процессор. Получаем начальную загрузку каждого процессора (см. табл. 10).

Таблица 10

Процессор 1	5			5
Процессор 2	2,4			2,4
Процессор 3	4			4

Шаг 2. Оставшиеся задания $d_6=1,15$, $d_5=0,75$, $d_1=0,5$, $d_2=0,5$, $d_3=0,5$, $d_9=0,5$, $d_4=0,25$ распределяем таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их плотности, было распределено на наименее загруженный процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3. Получаем общую загрузку каждого процессора (см. табл. 11).

Таблица 11

Процессор 1	5	0,5		5,5
Процессор 2	2,4	1,4		3,8
Процессор 3	4	1		5

Шаг 3. Оставшиеся задания $d_2=0,5$, $d_3=0,5$, $d_9=0,5$, $d_4=0,25$ распределяем таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их плотности, было распределено на наименее загруженный процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3. Получаем общую загрузку каждого процессора (см. табл. 12).

Таблица 12

Процессор 1	5	0,5	0,5	6
Процессор 2	2,4	1,4	0,6	4,4
Процессор 3	4	1	1	6

Упорядочим полученные для процессоров расписания по возрастанию директивных сроков выполнения заданий (см. табл. 13).

Таблица 13

Процессор 1	d_1	d_3	d_7	
Процессор 2	d_2	d_6	d_8	
Процессор 3	d_5	d_9	d_{10}	

Рассчитаем коэффициенты средней загрузки процессоров для полученных для них расписаний выполнения заданий (см. табл. 14).

Таблица 14

Процессор 1	0,5	0,5	0,7	0,57
Процессор 2	0,33	0,57	0,54	0,48
Процессор 3	0,33	0,24	0,34	0,31

Для тестовой последовательности заданий коэффициент средней загрузки составляет 0,94, при этом после распределения заданий между параллельными процессорами выполняется неравенство (1) – $0,94 \leq 1,71$. После завершения процедуры распределения всех заданий для каждого процессора реализуются алгоритмы масштабирования скорости (напряжения и частоты) одиночного процессора, рассмотренные в работах [6–8].

Общая временная сложность данного алгоритма распределения заданий составляет: сложность определения плотностей заданий и сортировки заданий по убыванию плотностей – $O(n + n \log n)$; сложность определения процессора с максимальной скоростью и сортировки скоростей процессоров по их убыванию – $O(m \log m)$; сложность определения процессора с наименьшей загрузкой с сортировкой процессоров по возрастанию их загрузки – $O(m \log m)$; сложность масштабирования скорости и определения общей загрузки на каждом этапе для каждого из m процессоров – $O(m \log n + m \log m + m * k + m \log m)$, где k – количество заданий, распределенных на один процессор. Таким образом, временная сложность данного алгоритма составляет $O(n \log n + m \log m + m * k)$, т.е. является полиномиальной.

2.2. Алгоритм на основе метода распределения заданий с директивными сроками с сортировкой заданий по убыванию их плотности с использованием процедуры Round Robin (HDF RR)

Предлагаемый алгоритм является модификацией алгоритмов, исследованных в работах [3, 4], и отличается тем, что в нем используются нормализованные (приведенные) относительно максимального значения скорости процессоров.

Шаг 1. Распределяем тестовые задания в порядке убывания их плотности (см. п. 1.2) по всем 3-ем процессорам с учетом их разных скоростей. Мощность распределяемого множества заданий – 3. В табл. 15–17 в последнем столбце приведены суммарные значения плотностей заданий загрузок процессоров. Получаем начальную загрузку каждого процессора (см. табл. 15).

Таблица 15

Процессор 1	5			5
Процессор 2	2,4			2,4
Процессор 3	4			4

Шаг 2. Оставшиеся задания $d_6=1,15$, $d_5=0,75$, $d_1=0,5$, $d_2=0,5$, $d_3=0,5$, $d_0=0,5$, $d_4=0,25$ распределяем таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их плотности, было распределено на следующий в списке процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3.

Получаем общую загрузку каждого процессора (см. табл. 16).

Таблица 16

Процессор 1	5	1,15		6,15
Процессор 2	2,4	0,9		3,3
Процессор 3	4	1		5

Шаг 3. Оставшиеся задания $d_2=0,5$, $d_3=0,5$, $d_0=0,5$, $d_4=0,25$ распределяем таким образом, чтобы каждое из нераспределенных заданий, отсортированных по убыванию их плотности, было распределено на следующий в списке процессор. Мощность распределяемого множества заданий – 3. Получаем общую загрузку каждого процессора (см. табл. 17).

Таблица 17

Процессор 1	5	1,15	0,5	6,65
Процессор 2	2,4	0,9	0,6	3,9
Процессор 3	4	1	1	6

Упорядочим полученные расписания для каждого из процессоров по возрастанию директивных сроков выполнения распределенных на них заданий (см. табл. 18).

Таблица 18

Процессор 1	d_2	d_6	d_7	
Процессор 2	d_3	d_5	d_8	
Процессор 3	d_1	d_9	d_{10}	

Рассчитаем коэффициенты средней загрузки процессоров для полученных расписаний выполнения заданий (см. табл. 19).

Таблица 19

Процессор 1	0,33	0,57	0,81	0,57
Процессор 2	0,33	0,45	0,36	0,38
Процессор 3	0,5	0,16	0,28	0,31

Как следует из полученных результатов, коэффициенты средней загрузки процессоров составляют 0,57, 0,38 и 0,31, что соответствует худшей балансировке загрузки процессоров по сравнению с предыдущим методом. После завершения процедуры распределения всех заданий для каждого процессора реализуются алгоритмы масштабирования скорости одиночного процессора, рассмотренные в работах [6–8].

3. Программная архитектура и информационная технология реализации и экспериментального исследования алгоритмов

Для экспериментального исследования предложенных алгоритмов разработана программа на языке C# на платформе .NET Framework 4.0, состоящая из шести модулей (см. рис. 1). Модуль EDFScheduler.Model содержит описание всех сущностей системы. Модуль EDFScheduler.Data отвечает за работу с хранилищем данных (БД). Модуль EDFScheduler.Core содержит реализацию всех алгоритмов планирования, распределения, аппроксимации, сбор статистики для визуализации полученных результатов. Модуль EDFScheduler.Graphics предоставляет компоненты для построения различных графических данных. Модуль EDFScheduler.Resources определяет локализацию приложения для различных языков. Модуль EDFScheduler.UI содержит компоненты пользовательского интерфейса, а также приводит в действие остальные модули.

Диаграмма классов программы приведена на рис. 2. На рис. 2 показаны следующие модули: Main Window – окно с пользовательским интерфейсом; IProcessorDistributor – интерфейс, распределяющий процессорные элементы по последовательностям и пакетам работ (моделирование гетерогенной системы); IGenerator – интерфейс генерации последовательности работ и их пакеты; IJobDistributor – интерфейс распределения работ по различным процессорным элементам; IPowerMeter – интерфейс подсчета количества энергии; IProcessorRepository – интерфейс работы с хранилищем данных (БД) процессоров; IDVSAAlgorithm – интерфейс алгоритмов планирования переключения режимов работы процессора; IApproximateAlgorithm –

интерфейс алгоритмов аппроксимации относительных скоростей процессоров к возможным (рассчитываемым) дискретным режимам их работы.

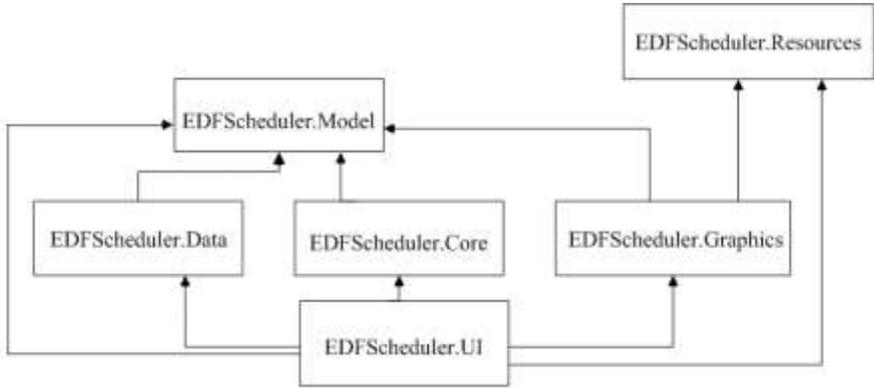


Рис. 1 – Структура программного обеспечения реализации и моделирования работы алгоритмов

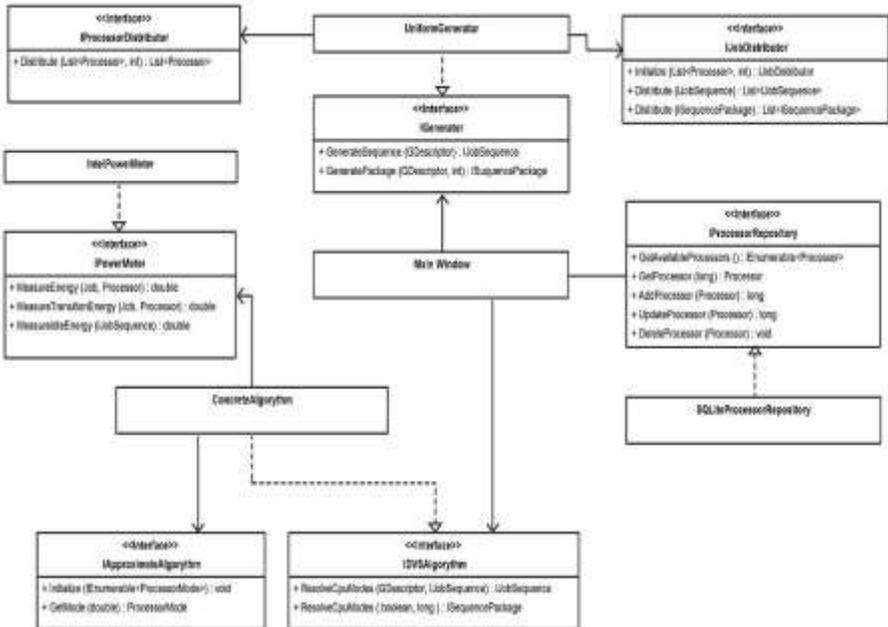


Рис. 2 – Диаграмма классов программы

Структура БД программы приведена на рис. 3, на котором приняты следующие обозначения: таблица «Processor» хранит в себе информацию о

процессоре, а именно: Id – идентификатор, Name – имя, Capacitance – емкостное сопротивление; TransitionLatency – максимальное время, которое может быть затрачено на переключение; IdleCoefficient – отношение количества электроэнергии, затрачиваемого в холостом режиме относительно электроэнергии, потребляемой в режиме с наибольшей скоростью; NominalModelId – идентификатор номинального режима; таблица «ProcessorMode» содержит информацию о режимах процессора: Id – идентификатор, Processor – идентификатор родительского процессора, Name – имя, Frequency – частота работы процессора в данном режиме, Voltage – напряжение ядра процессора в данном режиме, RelativeSpeed – относительная скорость процессора; таблица «Setting» содержит общие настройки системы.

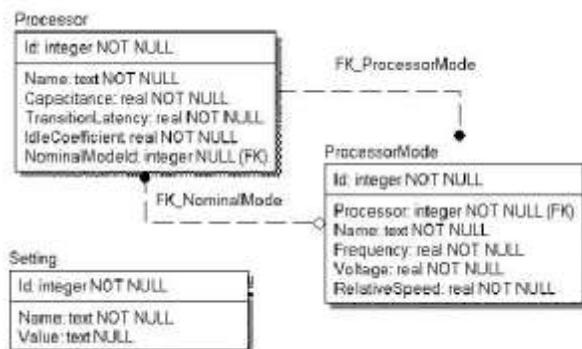


Рис. 3 – Структура БД программной реализации алгоритмов масштабирования скоростей процессоров

4. Результаты вычислительных экспериментов и их анализ

Экспериментальное исследование работы алгоритмов HDF и HDF RR проводилось на основе следующих настроек: длительности заданий определялись по равномерному закону в диапазоне [1, 1000]; директивные сроки выполнения заданий – по равномерному закону в диапазоне [1, 3]; количество заданий – в диапазонах [1, 100], [1, 1000], [1, 10000]; количество процессоров – в диапазоне 1–100, количество наблюдений – 50. В качестве критерия (параметра) балансировки загрузки процессоров для методов распределения использовано стандартное (среднеквадратическое) отклонение нагрузок всех процессоров от среднего значения. Результаты моделирования алгоритмов масштабирования для различных методов показаны на рис. 4–7.

Выводы. Рассмотренные в работе алгоритмы масштабирования частот для параллельных процессоров и их моделирование при помощи разработанного программного обеспечения позволяют реализовать методы распределения заданий между процессорами и последующую настройку режимов

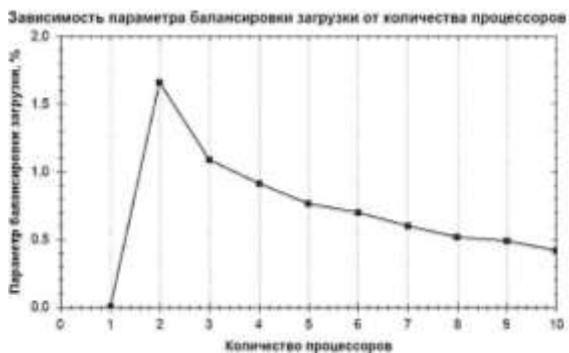


Рис. 4 – Зависимость балансировки загрузки от количества процессоров (типов процессоров – 2) для метода HDF (1000 заданий)



Рис. 5 – Зависимость балансировки загрузки от количества процессоров (типов процессоров – 3) для метода HDF (2000 заданий)



Рис. 6 – Зависимость балансировки загрузки от количества процессоров (типов процессоров – 2) для метода HDF RR (1000 заданий)

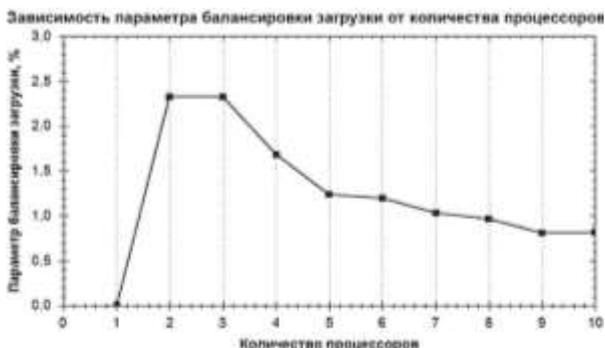


Рис. 7 – Зависимость балансировки загрузки от количества процессоров (типов процессоров – 3) для метода HDF RR (2000 заданий)

переключения скоростей одиночных процессоров, обеспечивающих построение допустимых расписаний выполнения заданий и, таким образом, оптимизацию их энергопотребления.

Полученные экспериментальные результаты моделирования вычислительных систем с различным количеством типов (моделей) процессоров, характеризующих гетерогенность архитектуры многопроцессорной системы, их количеством, различным количеством заданий и директивных сроков их выполнения показали, что предлагаемые методы позволяют достичь лучшей балансировки загрузки по сравнению с существующими в случае, когда количество заданий существенно превышает количество процессоров; гетерогенность многопроцессорной системы ухудшает балансировку загрузки; неравномерная загрузка процессоров может привести к ухудшению результатов работы алгоритмов масштабирования скоростей одиночных процессоров. В дальнейшем предполагается разработка алгоритмов распределения заданий между параллельными процессорами, в которых балансировка загрузки осуществляется на каждом шаге распределения заданий на основе определения текущей величины средней загрузки процессора, то есть после каждого распределения заданий на процессоры.

Список литературы: 1. Kim K. H. Power Aware Scheduling of Bag-of-Tasks Applications with Deadline Constraints on DVS-enabled Clusters / K. H. Kim, R. Buyya, J. Kim // Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid. – 2007. – p. 541–548. 2. Yao F.F. A scheduling model for reduced CPU energy / F.F. Yao, A.J. Demers, S. Shenker // Proc. 36th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 1995. – p. 374–382. 3. Albers S. Speed scaling on parallel processors / S. Albers, F. Müller, S. Schmelzer // Proc. 19th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures. – 2007. – p. 289–298. 4. Angel E. Speed scaling on parallel processors with migration / E. Angel, E. Bampis, F. Kacem [et. al.] // Proc. Of International Conference Euro-Par 2012 Parallel Processing. – 2012. – p. 128–140. 5. Lefurgy C. Energy Management for Commercial Servers / C. Lefurgy, K. Rajamani, F. Rawson et al. // Computer. – 2003. – №36 (12). – p. 39–48. 6. Минухин С.В. Алгоритмы оптимизации энергопотребления и повышения эффективности процессоров с масштабированием частоты и напряжения гетерогенного кластера / С.В. Минухин,

М.И. Сухонос // International Conference Parallel and Distributed Computing Systems PDCS 2013 (Ukraine, Kharkiv, March 13-14, 2013). – 2013. – р. 209–217. **7.** *Минухин С. В.* Энергоэффективные алгоритмы масштабирования скорости процессоров вычислительного кластера / *С. В. Минухин* // Second International Conference "Cluster Computing" CC 2013 (Ukraine, Lviv, June 3-5, 2013). – 2013. – С. 131–140. **8.** *Минухин С. В.* Алгоритмы оптимального определения напряжения и частоты процессоров вычислительного кластера для пакетов заданий с директивными сроками выполнения / *С. В. Минухин* // Проблеми розвитку ІТ-індустрії. Системи обробки інформації. – 2013. – Вип. №3 (110). – Т. 2. – С. 184.

Надійшла до редколегії 28.08.2013

УДК 004.021, 681.324

Алгоритмы, программная архитектура и информационная технология моделирования методов масштабирования скоростей параллельных процессоров вычислительного кластера // *С. В. Минухин, М. И. Сухонос* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 62 (1035). – С. 78–92. – Бібліогр.: 8 назв.

Запропоновано алгоритми масштабування швидкостей паралельних процесорів багатопроцесорних систем і обчислювальних кластерів, що мають гомогенну та гетерогенну архітектуру. Розроблено програмну архітектуру та інформаційну технологію для моделювання роботи алгоритмів, що використовують різні методи розподілу завдань на процесори, наведено приклади та результати їх експериментального дослідження, які підтвердили їх ефективність для побудови енергоефективних розкладів виконання завдань з директивними строками виконання в багатопроцесорних системах і обчислювальних кластерах.

Ключові слова: алгоритм, процесор, швидкість, завдання, директивний строк, енергоспоживання, тривалість, щільність завдання, сортування, завантаження.

There have been proposed the algorithms for speed scaling on parallel processors for multiprocessor systems and computing clusters with homogeneous and heterogeneous architectures. Software architecture and information technology for simulation of algorithms using a variety of methods for allocating tasks to processors are developed. There are examples and the results of their experimental studies proving its effectiveness for constructing energy efficient scheduling task execution with deadlines in multiprocessor systems and computing clusters.

Keywords: algorithm, processor, speed, task, deadline, energy consumption, duration, density task, sorting, load.

УДК 658.012

Т. И. КАТКОВА, канд. пед. наук, доцент, БУМиБ, Бердянск

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СТРАТЕГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Проведен анализ традиционных приемов скаляризации векторного критерия качества объекта: средневзвешенное значений составляющих вектора частных характеристик объекта и близость к

© Т. И. Каткова, 2013

объекту-«идеалу». Показано, что эти скалярные критерии не эквивалентны. Рассмотрена задача оценки чувствительности значений этих скалярных критериев к ошибкам в оценке важности частных характеристик.

Ключевые слова: стратегические направления, математические модели, выбор предпочтений, скаляризация векторного критерия.

Введение. Задачи выбора стратегических направлений деятельности и зон хозяйствования принадлежит к классу задач принятия решения в многоальтернативной ситуации. Трудности решения этой задачи существенно возрастают в связи с тем, что принимаемое решение должно быть приемлемым по многим, часто противоречивым, критериям. Эти критерии обычно формулируют как факторы, которые могут быть количественно оценены и в совокупности использованы для результирующей оценки уровня перспективности, целесообразности, полезности, эффективности при выборе стратегических направлений деятельности. К числу таких факторов можно отнести:

- уровень соответствия планируемой деятельности важнейшим современным тенденциям развития экономики, техники, права и т.п.;
- уровень заполненности «ниши»;
- уровень соответствия планируемой к выпуску продукции европейским (мировым) стандартам;
- уровень прогнозируемой прибыли;
- возможность использования эффективной ценовой конкурентной политики при реализации планируемой к выпуску продукции;
- предполагаемая продолжительность жизненного цикла планируемой к выпуску продукции;
- степень обеспеченности производства планируемой продукции (наличие сырьевых, технологических ресурсов, рабочей силы, уровень профессионализма руководящего персонала, эффективность и качество структуры системы управления и т.п.);
- степень обеспеченности финансовым ресурсами (наличие собственного капитала, возможность привлечения дополнительных источников финансирования выпуска планируемой продукции);
- уровень неопределенности рыночной ситуации, соответствующей выбираемым стратегическим направлениям деятельности.

Число факторов, влияющих на выбор стратегического направления деятельности, можно без труда увеличить. Важным является то обстоятельство, что необходимость учета этих факторов при принятии решения делает задачу выбора многокритериальной.

На практике используются несколько стандартных приемов скаляризации векторного критерия. Однако, недостаточно изученным является вопрос о том, какой из них более предпочтителен в задаче выбора стратегического направления деятельности предприятия. Сформулируем соответствующую задачу.

Постановка задачи. Задача выбора предпочтений для сравниваемых объектов (или действий, стратегий) – традиционная задача человеческой практики. Желание сделать выбор возможно более обоснованным приводит к необходимости ввода и рассмотрения каких-либо характеристик, факторов, параметров объектов, которые можно было бы измерить или оценить количественно. При этом, если объект характеризуется значениями m параметров (например, F_1, F_2, \dots, F_m), то задача выбора сводится к отысканию и использованию какого-либо обоснованного правила, в соответствии с которым можно было бы сравнить вектор $(F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{im})$ параметров i -го объекта и вектор $(F_{k1}, F_{k2}, \dots, F_{km})$ параметров k -го объекта. Это правило должно быть реализовано в виде некоторой формальной процедуры, применение которой позволило бы сделать однозначный выбор в пользу одного или другого объекта.

Понятно, что трудности решения проблемы предпочтения одного варианта действий перед другим возникают в связи с тем, что выбор наилучшего варианта не может быть сделан с учетом только одного, даже очень важного показателя, например, по величине прибыли. Необходимость учета всех экономических показателей приводит к векторности критерия. Известные технологии решения задач выбора с векторным критерием состоят в следующем.

Прежде всего делается попытка реализовать Парето-отсевивание неконкурентоспособных вариантов. В связи с этим вводится понятие мажорирования. Будем считать, что объект A мажорирует сравниваемый с ним объект B , если все экономические показатели объекта A не хуже соответствующих показателей объекта B , и имеется по меньшей мере один показатель, по которому объект A лучше, чем объект B .

В результате применения этой процедуры число конкурирующих вариантов уменьшается, но, как правило, не слишком существенно. Поэтому дальнейшая процедура ранжирования сравниваемых объектов использует те или иные способы скаляризации векторного показателя. Опишем и сравним их.

Основные результаты. На практике применяют следующие основные подходы к решению задачи скаляризации [1–4].

- 1) Формирование и расчет средневзвешенного показателя.
- 2) Формирование объекта-идеала и расчет «расстояния» от оцениваемого объекта до этого объекта-идеала.

Для реализации этих подходов необходимо предварительно решить подзадачу ранжирования показателей по степени их важности и расчета весовых коэффициентов, учитывающих различия в важности этих показателей.

Решение задачи ранжирования показателей обычно основывается на результатах обработки данных, получаемых при экспертном оценивании уровня значимости отдельных показателей. Общеизвестны трудности, возник-

кающие перед экспертами в связи с необходимостью приписать каждой характеристике объекта выбора конкретное число, определяющее соответствующий весовой коэффициент. Реально эти трудности приводят к большому разбросу значений этих коэффициентов, что объективно отражает плохую, как правило, согласованность мнений экспертов. Один из возможных естественных путей решения задачи ранжирования состоит в следующем.

Каждому из экспертов предъявляется список показателей. Задача эксперта состоит в оценивании ранга каждого из показателей путем формирования последовательности показателей, упорядоченных по убыванию степени их важности. При этом каждый из экспертов, если он считает нужным, может добавить в этот список какие-то показатели, оказывающие существенное, по его мнению, влияние на уровень перспективности направления, или исключить какие-то из имеющихся. Результаты ранжирования сводятся в матрицу $A = (a_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$, в которой a_{ij} – ранг, присвоенный i -му показателю j -м экспертом.

Статистическая обработка результатов опроса экспертов состоит в обоснованном оценивании ранга каждого показателя, объективно отображающего коллективное мнение экспертов. Эта задача для конкретного показателя i может быть решена путем отыскания такого компромиссного значения, которое будет минимизировать сумму квадратов его отклонений от рангов, присвоенных этому показателю экспертами. Введем оптимизируемый функционал для i -го показателя

$$J_i = \sum_{j=1}^n (r_i - a_{ij})^2 \Rightarrow \min_{r_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где r_i – искомая компромиссная оценка для i -го показателя. Минимум (1) найдем непосредственно, дифференцируя (1) по r_i , $i = 1, 2, \dots, m$.

$$\frac{dJ_i}{dr_i} = 2 \sum_{j=1}^n (r_i - a_{ij}) = 2 \left(nr_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) = 0,$$

откуда

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что наилучшая в смысле наименьших квадратов компромиссная оценка для каждого показателя есть обычное среднее арифметическое рангов, присвоенных этому показателю экспертами.

Рассмотрим теперь дисперсии экспертных оценок для каждого показателя, характеризующие разброс этих оценок относительно средних:

$$D_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (a_{ij} - r_i)^2, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Ранжируем показатели в порядке убывания их среднего ранга. Пусть при этом показатели расположатся в последовательности $L = (l_1, l_2, \dots, l_m)$, где l_k – номер показателя, стоящего на k -м месте в полученной последовательности L .

Теперь необходимо оценить степень согласованности мнений экспертов. В качестве меры согласованности может быть использована средняя дисперсия оценок рангов показателей, вычисляемая по формуле

$$D_{\text{нб}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_i.$$

Ясно, что $D_{\text{cp}} = 0$, в том случае, если оценки рангов всех экспертов по каждому показателю совпадают (т.е. $a_{ij} \equiv r_i, j=1, 2, \dots, n$). С другой стороны, максимальная средняя дисперсия будет получена при максимальной несогласованности рангов, присвоенных экспертами, которая будет реализована, если $n = m$ и каждый из показателей получит по совокупности мнений экспертов все возможные номера. При этом

$$\begin{aligned} D_{\text{max}} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(j - \frac{n+1}{2} \right)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[j^2 - j(n+1) + \frac{(n+1)^2}{4} \right] = \\ &= \frac{1}{n} \left[\frac{n(n+1)(2n+1)}{6} - \frac{n(n+1)^2}{2} + \frac{n(n+1)^2}{4} \right] = \frac{n^2 - 1}{12}. \end{aligned}$$

Другой показатель меры согласованности – коэффициент конкордации вычисляется по формуле [5]: $w = \frac{12}{n(m^2 - 1)m^2} \sum_{i=1}^m \left[\frac{n(m+1)}{2} - \sum_{j=1}^n a_{ij} \right]^2$.

Полученная ранжированная последовательность показателей может быть использована для расчета весовых коэффициентов, характеризующих важность показателей. Простейшая методика состоит в том, чтобы присвоить показателю вес в соответствии с его местом в ранжированной последовательности. При этом наибольший вес должен иметь показатель, имеющий минимальный ранг, равный 1, а наименьший – показатель, имеющий максимальный ранг, равный m . Поскольку ранг показателя, стоящего на k -м месте от начала в последовательности L равен $m+1-k$, то его весовой коэффициент α_k может быть рассчитан по формуле

$$\alpha_k = \frac{m+1-k}{\sum_{k=1}^m (m+1-k)} = 2 \frac{m+1-k}{m(m+1)}. \quad (4)$$

При этом сумма α_k , $k=1,2,\dots,m$, будет равна 1, а численное значение α_k будет тем большим, чем выше место показателя в ранжированной последовательности. Несмотря на простоту и многократное применение этой методики, целесообразность её использования вызывает серьезные сомнения.

Дело в том, что два или даже несколько каких-либо показателей, имеющих разные номера в последовательности L , могут практически не отличаться по важности с точки зрения их влияния на перспективность направления и, следовательно, должны иметь одинаковый вес. С другой стороны, может оказаться, что два рядом стоящих показателя из последовательности L будут отличаться по важности друг от друга гораздо более существенно, нежели это следует из формулы (4). Иными словами, полученная в результате обработки опроса экспертов информация о среднем ранге r_i показателя должна использоваться не только для упорядочивания показателей, но и более конструктивно - для расчета весовых коэффициентов.

С целью оценки весов показателей сначала для каждой пары соседних показателей (l_k, l_{k+1}) в последовательности L проведем проверку статистической гипотезы о различии их средних рангов r_{l_k} и $r_{l_{k+1}}$. Для этого используем стандартную процедуру проверки гипотезы H_0 о равенстве средних двух выборок $B_{l_k} = (a_{l_k,1}; a_{l_k,2}; \dots; a_{l_k,n})$ и $B_{l_{k+1}} = (a_{l_{k+1},1}; a_{l_{k+1},2}; \dots; a_{l_{k+1},n})$. Здесь выборка B_{l_k} соответствует набору рангов, присвоенных экспертами l_k -му показателю, а $B_{l_{k+1}}$ – набору рангов для l_{k+1} -го показателя. Будем считать, что выборка B_{l_k} извлечена из генеральной совокупности случайных величин, распределенных нормально с математическим ожиданием r_{l_k} и дисперсией D_{l_k} , а выборке $B_{l_{k+1}}$ соответствует нормальное распределение с параметрами $(r_{l_{k+1}}, D_{l_{k+1}})$. Такая гипотеза при хорошей согласованности рангов (высокой квалификации экспертов) вполне допустима.

Формируем критерий [6]:

$$t_k = \frac{r_{l_k} - r_{l_{k+1}}}{\sqrt{\frac{D_{l_k}}{n} + \frac{D_{l_{k+1}}}{n}}}, \quad k=1,2,\dots,m.$$

Критерий t_k – нормально распределенная случайная величина, математическое ожидание которой равно нулю (если верна гипотеза H_0), а дисперсия равна единице.

Вычисленные значения t_k сравниваем с критическим значением $t_{кр}$, взятым из таблицы функции Лапласа $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ для заданного уровня

значимости $\alpha = 0.1$ в соответствии с равенством $\Phi(t_{кр}) = \frac{1-2\alpha}{2} = 0.4$.

Если при этом $t_k \geq t_{кр}$, то различие между средними для наборов B_{l_k} и $B_{l_{k+1}}$ значимо. Тогда показателям l_k и l_{k+1} присваиваются веса соответственно $v_{l_k} = m+1-r_{l_k}$ и $v_{l_{k+1}} = m+1-r_{l_{k+1}}$. Если же для некоторого k имеет место неравенство $t_k < t_{кр}$, то различие незначимо. В этом случае обоим показателям присваивается одинаковый вес $v_{l_k} = v_{l_{k+1}} = m+1 - \frac{r_{l_k} + r_{l_{k+1}}}{2}$.

В результате реализации описанной процедуры набору показателей $(l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_m)$ ставится в соответствие набор весовых коэффициентов $(v_{l_1}, v_{l_2}, \dots, v_{l_k}, \dots, v_{l_m})$.

Показатели, используемые для оценки перспективности направлений, различаются по смыслу, отображают разные экономические характеристики этих объектов. Соответствующие их количественные значения имеют разную размерность и могут принимать значения, существенно отличающиеся по величине. С целью обеспечения возможности их сравнения и последующего использования при формировании обобщенного показателя необходимо выполнить их нормировку.

Стандартно применяемый способ нормировки показателей состоит в пересчете их значений по формуле

$$z_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{i\max}}{r_{i\max} - r_{i\min}}, \quad (5)$$

где r_{ij} – значение i -го показателя для j -го объекта, $i=1,2,\dots,m$, $j=1,2$, $r_{i\max} = \max\{r_{i1}, r_{i2}\}$, $r_{i\min} = \min\{r_{i1}, r_{i2}\}$.

Ясно, что расчет по формуле (5), приводит численные значения нормированных показателей z_{ij} к интервалу $[0,1]$, причем по крайней мере для двух объектов нормированные значения находятся на границах этого интервала.

Во многих случаях более удобной является нормировка, переводящая значения a_{ij} в интервал $[-1,1]$. При этом используется формула

$$z_{ij} = \frac{2r_{ij} - (r_{i\max} + r_{i\min})}{r_{i\max} - r_{i\min}}, \quad i=1,2,\dots,m; \quad j=1,2. \quad (6)$$

Еще один часто используемый вариант нормировки выполняется в соответствии с выражением

$$z_{ij} = \frac{a_{ij} - r_i}{3\sigma_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \quad (7)$$

где r_i и σ_i вычисляется в соответствии с (2) и (3).

При использовании (7) нормированные значения с вероятностью близкой к единице лежат в интервале $[-1, 1]$, причем границы интервала не обязательно достигаются.

Пусть используется нормировка в соответствии с формулой (5). В результате её проведения двум сравниваемым объектам поставим в соответствие две точки $z_1 = (z_{11}), z_2 = (z_{12})$ в m -мерном факторном пространстве Φ_m .

Множество E показателей разобьем на два подмножества:

E_+ – подмножество показателей, для которых увеличение их численного значения соответствует увеличению перспективности направления,

E_- – подмножество показателей, для которых, напротив, уменьшение численного значения соответствует увеличению перспективности направления.

Теперь можно рассчитать средневзвешенное значение степени целесообразности использования каждой из двух конкурирующих стратегий по формуле

$$S_j^{(1)} = \sum_{i \in E_+} v_i z_{ij} - \sum_{i \in E_-} v_i z_{ij}, \quad j = 1, 2. \quad (8)$$

Для расчета обобщенного показателя часто используют соотношение, аналогичное предыдущему, но представляющее собой не аддитивную, а мультипликативную свертку

$$S_j^{(2)} = \frac{\sum_{i \in E_+} v_i z_{ij}}{\sum_{i \in E_-} v_i z_{ij}}, \quad j = 1, 2. \quad (9)$$

Ясно, что уровень целесообразности выбора стратегического направления тем выше, чем больше численное значение $S_j^{(1)}$ или $S_j^{(2)}$.

Заметим, однако, что сравнение объектов по обобщенным показателям $S_j^{(1)}$ и $S_j^{(2)}$ не эквивалентно, как это принято считать. В самом деле, пусть, например, объект 1 лучше объекта 2 по показателю $S_j^{(1)}$. При этом $S_1^{(1)} > S_2^{(1)}$ или

$$\sum_{i \in E_+} v_i z_{i1} - \sum_{i \in E_-} v_i z_{i1} > \sum_{i \in E_+} v_i z_{i2} - \sum_{i \in E_-} v_i z_{i2}.$$

Это неравенство, очевидно, равносильно следующему

$$\frac{1}{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i1}} \left[\sum_{i \in E_+} v_i z_{i1} - \sum_{i \in E_-} v_i z_{i1} \right] > \frac{1}{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i1}} \left[\sum_{i \in E_+} v_i z_{i2} - \sum_{i \in E_-} v_i z_{i2} \right] \frac{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i2}}{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i2}} =$$

$$= \frac{1}{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i2}} \left[\sum_{i \in E_+} v_i z_{i2} - \sum_{i \in E_-} v_i z_{i2} \right] \frac{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i2}}{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i1}},$$

откуда

$$S_1^{(2)} - 1 > (S_2^{(2)} - 1) \frac{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i2}}{\sum_{i \in E_-} v_i z_{i1}}.$$

Легко видеть, что из последнего неравенства следует, что $S_1^{(2)} > S_2^{(2)}$ только в том случае, когда $\sum_{i \in E_-} v_i z_{i2} > \sum_{i \in E_-} v_i z_{i1}$, что выполняется не обязательно.

Принципиально другой подход к скаляризации векторного показателя используется при формировании, так называемого, объекта-«идеала». При этом традиционно [4,7] используется следующая методика. Координаты точки, соответствующей объекту-«идеалу», выбираются из соотношения

$$u_i^* = \begin{cases} \max_j \{z_{ij}\}, & i \in E_+, \\ \min_j \{z_{ij}\}, & i \in E_-, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (10)$$

Теперь в качестве меры оценки качества объектов можно использовать расстояние между точкой в факторном пространстве Φ_m , соответствующей произвольному, например, j -му объекту, и точкой, задающей «идеальный» объект. Естественно, целесообразность использования конкретного объекта тем выше, чем это расстояние меньше. Для расчета этого расстояния R_{j0} можно использовать меры, вычисляемые в различных метриках. Из них наиболее употребительными являются следующие [7,8].

1. Расстояние Минковского

$$R_{j0}^{(1)} = \left(\sum_{i=1}^m |z_{ij} - u_i^*|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

В частном случае, когда $p = 2$, получаем обычную евклидову метрику. Если $p = 1$, то формула (11) дает так называемое вариационное расстояние Колмогорова (или манхэттенское расстояние).

2. Расстояние Сангхви

$$R_{j0}^{(2)} = \sum_{i=1}^m \frac{(z_{ij} - u_i)^2}{z_{ij} + u_i}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

В обоих соотношениях, чем меньше величина R_{j0} , тем выше качество объекта.

Мера качества объекта (11) может быть сделана более адекватной, если учесть различия в важности показателей, рассчитываемых по методике, изложенной выше. Такая мера называется расстоянием Махаланобиса и вычисляется по формуле

$$Q_{j0} = \left(\sum_{i=1}^m v_i (z_{ij} - u_i)^p \right)^{\frac{1}{p}}.$$

В частном случае, когда $p = 2$, получаем

$$Q_{j0} = \left(\sum_{i=1}^m v_i (z_{ij} - u_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Покажем, что использование и учет весовых коэффициентов позволяет более правильно выбрать объект, наиболее близкий к объекту-«идеалу».

Пусть, для простоты, объекты A и B характеризуются двумя показателями, причем координаты объекта A в двумерном пространстве определяются вектором (a, b) , координаты объекта $B - (b, a)$, а координаты объекта-«идеала» C равны (c, c) . Вычислим расстояния от объектов A и B до объекта C в обычной метрике

$$R_{AC} = \sqrt{(c - a)^2 + (c - b)^2},$$

$$R_{BC} = \sqrt{(c - b)^2 + (c - a)^2}.$$

Очевидно, $R_{AC} = R_{BC}$.

Введем теперь весовые коэффициенты v_1 и v_2 , оценивающие важности показателей, причем пусть $v_1 > v_2$. Предположим далее, что $|c - a| < |c - b|$. Это означает, что объект A ближе к объекту-«идеалу» по первой координате, а объект B – по второй.

Рассчитаем теперь расстояние Махаланобиса по формуле (12). Получим

$$Q_{AC} = \sqrt{v_1(c-a)^2 + v_2(c-b)^2}, \quad Q_{BC} = \sqrt{v_1(c-b)^2 + v_2(c-a)^2}.$$

Вычислим теперь величину

$$\begin{aligned} d &= Q_{AC}^2 - Q_{BC}^2 = v_1(c-a)^2 + v_2(c-b)^2 - v_1(c-b)^2 - v_2(c-a)^2 = \\ &= (v_1 - v_2)(c-a)^2 - (v_1 - v_2)(c-b)^2 = (v_1 - v_2)[(c-a)^2 - (c-b)^2] \end{aligned}$$

В соответствии со сделанным выше предположением, число, стоящее в квадратных скобках, отрицательно. Следовательно, $Q_{AC}^2 < Q_{BC}^2$ или $Q_{AC} < Q_{BC}$. Последнее означает, что объект A в метрике, учитывающей различия в важности показателей, находится ближе к объекту-«идеалу», нежели объект B . Это является прямым следствием того, что объект A ближе к объекту C по более важному показателю, чем это имеет место для объекта B .

Отметим, что описанные выше стандартные подходы в задаче скаляризации не эквивалентны, то есть если объект A «лучше» объекта B с точки зрения средневзвешенного показателя, то он не обязательно ближе к «идеалу». Для иллюстрации рассмотрим простейший пример.

Пусть объекты A и B имеют соответственно координаты $(a_1, a_2), (b_1, b_2)$, весовые коэффициенты равны v_1 и v_2 и, кроме того, известно, что $a_1 < b_1$, $a_2 > b_2$ и все показатели относятся к E_+ .

При этом

$$S_A^{(i)} = v_1 a_1 + v_2 a_2, \quad S_B^{(i)} = v_1 b_1 + v_2 b_2.$$

Рассчитаем координаты объекта-«идеала»:

$$U = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \max\{a_1, b_1\} = b_1 \\ \max\{a_2, b_2\} = a_2 \end{pmatrix}.$$

Тогда в евклидовой метрике

$$R_{A0} = [v_1(c_1 - a_1)^2 + v_2(c_2 - a_2)^2]^{\frac{1}{2}} = [v_1(b_1 - a_1)^2]^{\frac{1}{2}} = v_1^{\frac{1}{2}}(b_1 - a_1),$$

$$R_{B0} = [v_1(c_1 - b_1)^2 + v_2(c_2 - b_2)^2]^{\frac{1}{2}} = [v_2(a_2 - b_2)^2]^{\frac{1}{2}} = v_2^{\frac{1}{2}}(a_2 - b_2).$$

Теперь, объект A «лучше» объекта B по средневзвешенному показателю, если

$$S_A^{(1)} - S_B^{(1)} = v_1(a_1 - b_1) + v_2(a_2 - b_2) = v_2(a_2 - b_2) - v_1(b_1 - a_1) > 0. \quad (13)$$

С другой стороны, объект A «лучше» объекта B по степени близости к объекту-«идеалу», если

$$R_{B_0} - R_{A_0} = v_2^2(a_2 - b_2) - v_1^2(b_1 - a_1) > 0. \quad (14)$$

Неравенства (13) и (14) не эквивалентны. Например, если $a_1 = 4$, $a_2 = 8$, $b_1 = 6$, $b_2 = 4$, $v_1 = 3$, $v_2 = 1$, то $S_A^{(1)} = 20$, $S_B^{(1)} = 22$, то есть B «лучше» A , но $R_{A_0} = 2\sqrt{3}$, $R_{B_0} = 4$, то есть A «лучше» B .

Непосредственным подсчетом легко показать, что при других значениях коэффициентов d_1 , d_2 характер предпочтения может измениться. Это обстоятельство делает актуальной проблему установления правильного и возможно более точного соотношения между оценками важности факторов.

Наконец, анализируемые способы скаляризации неравноценны с точки зрения другой системной характеристики совокупности факторов, определяющих перспективность, полезность, эффективность выбираемого направления деятельности-чувствительности результирующей ошибки к погрешностям исходных данных.

Чувствительность – это мера зависимости системных характеристик от возможных вариаций элементов. Численная оценка этой меры определяется соотношением

$$\eta = \sum_{i=1}^m \frac{\partial H}{\partial v_i} dv_i,$$

где H – системная характеристика объекта.

Определим чувствительность системной характеристики (скалярная оценка уровня привлекательности направления деятельности) к возможным ошибкам в оценке важности частных характеристик (влияющих факторов).

Имеем

$$H_1 = \sum_{i=1}^m v_i r_i, \quad H_2 = \left[\sum_{i=1}^m v_i (r_i - r_i^{(0)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Тогда

$$\eta_1 = \sum_{i=1}^m r_i dv_i; \quad (15)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^m v_i (r_i - r_i^{(0)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^m (r_i - r_i^{(0)})^2 dv_i \right] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{(r_i - r_i^{(0)})^2 dv_i}{\left[\sum_{i=1}^m v_i (r_i - r_i^{(0)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (16)$$

Пусть

$$i_0 = \arg \max_i \{v_i\}.$$

При этом для η_2 можно получить следующую оценку:

$$\eta_2 \cong \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{(r_i - r_i^{(0)})^2 dv_i}{v_{i_0}^2 (r_{i_0} - r_{i_0}^{(0)}) \left(1 + \frac{1}{2} \sum_{i \neq i_0}^m \frac{v_i}{v_{i_0}} \frac{(r_i - r_i^{(0)})^2}{(r_{i_0} - r_{i_0}^{(0)})^2} \right)} < \sum_{i=1}^m \frac{(r_i - r_i^{(0)})^2 dv_i}{v_{i_0}^2 (r_{i_0} - r_{i_0}^{(0)})^2} < \sum_{i=1}^m r_i dv_i = \eta_1.$$

Таким образом, системная характеристика объекта, связанная с расчетом близости к объекту-«идеалу», менее чувствительна к ошибкам оценки важности влияющих факторов, нежели средневзвешенное значение этих факторов.

Выводы. Проведен анализ традиционных технологий расчета системных характеристик объектов, определяемых совокупностью их частных характеристик и использующих известные приемы скаляризации векторного критерия качества объекта. Подтверждено, что эти системные характеристики не эквивалентны. Показано, что скалярный критерий - близость к объекту-«идеалу» менее чувствителен к погрешностям в оценке важности частных характеристик, чем средневзвешенное значение частных критериев качества объекта.

Список литературы: 1. Бешелев С. Д. Экспертные оценки / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – Экспертные оценки. – М. : Наука, 1973, – 168 с. 2. Глотов В. А., Павельев В. В. Экспертные методы определения весовых коэффициентов / В. А. Глотов, В. В. Павельев // Автоматика и телемеханика. – 1976. № 12. – С. 95-107. 3. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решения при многих критериях. / Р. Л. Кини, Райфа Х. – М. : Радио и связь, 1981. – 212 с. 4. Подиновский В. В. Многокритериальные задачи принятия решений. – М. : Машиностроение, 1978. – 198 с. 5. Бережная Е. В., Бережной В. И. Математические методы моделирования экономических систем. – М. : Финансы и статистика, 2001. – 263 с. 6. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: «Высш. школа», 1972. – 368с. 7. Макаров И. М., Виноградская Т. М., Рубчинский А. А., Соколов В. Б. Теория выбора и принятия решения. – М. : Наука, 1982. – 312 с. 8. Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 518 с

Надійшла до редколегії 05.11.2013

УДК 658.012

Экономико-математическая модель задачи выбора стратегических направлений деятельности предприятия / Т. И. Каткова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № № 62 (1035). – С. 92–104. – Бібліогр.: 8 назв.

Проведено аналіз традиційних прийомів скаляризації векторного критерію якості об'єкта: середньозважене значень складових вектора приватних характеристик об'єкта і близькість до

об'єкта-«ідеалу». Показано, що ці скалярні критерії не еквівалентні. Розглянуто задачу оцінки чутливості значень цих скалярних критеріїв до помилок в оцінці важливості приватних характеристик.

Ключові слова: стратегічні напрями, математичні моделі, вибір переваг, скаляризація векторного критерію.

The analysis of the traditional methods of quality criteria scalarization the vector object: the weighted average values of the vector components of the particular characteristics of the object and its proximity to the object-"ideal". Demonstrated that these criteria are not scalar equivalent. The problem of estimating the sensitivity of the values of these scalar criteria to errors in assessing the importance of particular characteristics.

Keywords: strategic directions, mathematical models, the choice of preference, scalarization vector criterion.

УДК 004.4.075

М. Д. ГОДЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АСУ НТУ «ХПИ»;
И. Л. БРАГИНСКИЙ, президент компании НИКС Солюшенс, Харьков;
А. С. БАБИНА, студентка НТУ «ХПИ»;
Г. Г. РЫЧКО, студент НТУ «ХПИ»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛНОРАЗМЕРНОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Предлагаются данные, полученные в результате исследования информационной технологии управления качеством процесса разработки программного обеспечения на основе полно-размерной исходной информации.

Ключевые слова: процесс разработки программного обеспечения, технология, результаты исследования.

Введение. На сегодняшний день, в условиях рыночной экономики, проблема качества является важным показателем безопасности в различных сферах деятельности человека таких как: экономика, политика, экология и т.д. Согласно ISO, качество – это совокупность характеристик объекта, имеющая отношение к его способности удовлетворить установленные и предполагаемые требования потребителя. Усовершенствование действующих в организации процессов – одна из основных задач инженерии качества программных систем.

В работе в качестве основной идеологии управления качеством используется подход TQM (Total Quality Management), который приводит

© М. Д. Годлевский, И. Л. Брагинский, А. С. Бабина, Г. Г. Рычко, 2013

производителя программных продуктов к продолжительному успеху благодаря ориентации на удовлетворение потребности потребителя. TQM базируется на участии всех членов организации в совершенствовании процессов, продуктов, услуг и собственной профессиональной культуры.

TQM включает 2 механизма:

1. Quality Assurance – контроль качества – поддерживает необходимый уровень качества и заключается в предоставлении компанией определенных гарантий, дающих клиенту уверенность в качестве данного товара или услуги.
2. Quality Improvements – повышение качества – предполагает, что уровень качества необходимо не только поддерживать, но и повышать, соответственно поднимая и уровень гарантий.

В рамках философии TQM традиционные цели максимизации дохода, минимизации затрат и достижения контролируемого роста объемов выпуска программных продуктов превращаются в цели улучшения его качества, снижения сроков производства для достижения удовлетворенности потребителя [1].

Ранее для решения проблемы качества процесса разработки программного обеспечения (ПРПО) авторами работы были синтезированы информационная технология, математическая модель и алгоритм управления качеством на основе модели зрелости СММІ (Capability Maturity Model Integration), которая базируется на идеологии TQM [2, 3]. СММІ – модель зрелости, которая была разработана Институтом Программной инженерии на основе более ранней модели – СММ (Capability Maturity Model). СММІ выпущена в двух представлениях: поэтапном, основанном на уровнях зрелости, и непрерывном.

Каждый уровень зрелости состоит из огромного количества процессных областей.

Процессная область (Key Process Area, КРА) определяет кластер действий, в результате которых достигается огромное количество целей, важных с точки зрения увеличения производительности ПРПО.

Для того, чтобы организация отвечала требованиям процессной области, должны быть достигнуты все цели этой области.

Цели (Goals) резюмируют основные действия КРА и могут использоваться для определения эффективности внедрения организацией или проектом этой КРА. Цели определяют объем, границы и назначения каждой КРА. Цели могут быть общими (появляться в нескольких процессных областях) или частными (принадлежит к определенной процессной области и отвечает уникальной характеристикой, которая описывает, что должно быть выполнено для реализации процессной области). Каждая цель состоит из огромного количества практик (Practice).

Результаты исследований. Для проверки работоспособности разработанной информационной технологии были проведены расчеты на фрагменте целевого профайла [4], что доказало ее работоспособность.

В статье приведены расчеты для полноразмерной задачи. Согласно исходной информации о текущем состоянии ПРПО и целях, которые были поставлены руководством компании «NIX Solutions», необходимо поднять уровень возможности на единицу 13 практикам и на две единицы 14 практикам, фокусные области которых принадлежат 2 уровню зрелости, а также 19 практикам, фокусные области которых принадлежат 3 уровню зрелости. Попытка решения задачи для полноразмерной информации не увенчалась успехом при использовании персонального компьютера с Intel Core I5, тактовой частотой 2,67 Гц, оперативной памятью 4 Гб и жестким диском 500 Гб. Данная задача является NP-сложной и даже при использовании разработанного алгоритма последовательного анализа вариантов время на ее решение значительного превышает допустимые пределы. В связи с этим данная полноразмерная задача была декомпозирована на 5 подзадач, в каждой из которых рассматривалось от 10 до 14 практик, уровни возможности которых необходимо было поднять на одну единицу. Группировка всех практик, претендентов на поднятие уровня возможности, проводилась экспертами компании с точки зрения очередности (на уровне отдельной группы) поднятия их уровня возможности. Таким образом, было выделено 5 групп практик.

В рамках каждой группы на основе методологии коллективного экспертного оценивания (МКЭО) были присвоены весовые коэффициенты важности подпериодам планирования, фокусным областям, а также практикам в пределах их фокусных областей. Финансовые ресурсы для всех подзадач выделены в объеме, который достаточен для поднятия уровня возможности каждой практики на единицу. В пределах периода выделены три подпериода, длительность которых устанавливают эксперты и лица формирующие решение (неделя, десятидневка, месяц). На каждом подпериоде введены ограничения на финансовые ресурсы.

Таким образом, пять подзадач рассматривались на интервале времени, состоящем из 15 подпериодов. Фактически решалась задача определения очередности поднятия уровня возможности практик в пределах, отведенных для них периодов планирования.

Перейдем к анализу решения каждой из пяти подзадач. Более подробно с использованием графической иллюстрации рассмотрим результаты исследования первой и пятой подзадачи.

Подзадача № 1.

1. Фокусная область CM (Configuration Management). Практики: 1, 2, 3, 6, 7. Цель – поднятие уровня возможности с единицы до двух.
2. Фокусная область REQM (Requirements Management). Практики: 4, 5. Цель – поднятие уровня возможности с единицы до двух.
3. Фокусная область MA (Measurement and Analysis). Практики: 6, 7, 8. Цель – поднятие уровня возможности с нуля до единицы.

Результаты исследований приведены на рис. 1. Представлены: траектория увеличения 2 уровня зрелости на первом периоде управления, использо-

вание финансовых ресурсов и очередности поднятия уровня возможности отдельных практик. Как видно из рис. 1, степень достижения 2 уровня зрелости для исходного состояния ПРПО компании составляет 0,67 и за счет управляющих воздействий в конце планового периода достигает 0,76. На втором подпериоде не полностью израсходованы выделенные финансовые ресурсы. Они были перенесены и использованы в третьем подпериоде. На первом подпериоде, как видно из графика, две практики фокусной области «Управление конфигурацией» переходят с 1 на 2 уровень возможности. На втором подпериоде одна практика фокусной области «Управление требованиями» переходит с 1 на 2 уровень и три практики фокусной области «Измерение и анализ» переходят с 0 на 1 уровень. На третьем подпериоде три практики фокусной области «Управление конфигурацией» и одна практика фокусной области «Управление требованиями» переходят с 1 на 2 уровень возможности.

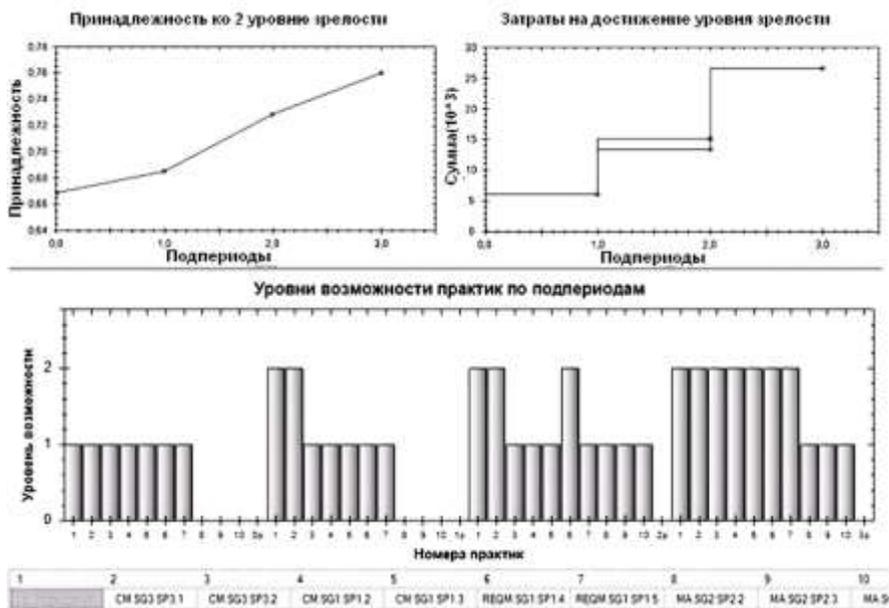


Рис. 1 – Результаты решения первой подзадачи

Подзадача № 2.

1. Фокусная область SAM (Supplier Agreement Management). Практики: 1–6. Цель – поднятие уровня возможности с нуля до единицы.
2. Фокусная область MA. Практики: 1–5. Цель – поднятие уровня возможности с нуля до единицы.

В результате управляющих воздействий в течение второго периода степень принадлежности ко 2-му уровню зрелости возросла с 0,76 до 0,86.

Подзадача № 3.

1. Фокусная область SAM. Практики: 1–6. Цель – поднятие уровня возможности с единицы до двух.
2. Фокусная область MA. Практики: 1–8. Цель – поднятие уровня возможности с единицы до двух.

В результате управляющих воздействий в конце планового периода ПР ПО организации выходит на второй уровень зрелости.

Следующие две подзадачи посвящены управлению качеством ПР ПО с целью разработки оптимальной стратегии продвижения организации к третьему уровню зрелости.

Подзадача № 4.

1. Фокусная область PMC (Project Monitoring and Control). Практики: 1, 2. Цель – поднятие уровня возможности с двух до трех.
2. Фокусная область PPQA (Process and Product Quality Assurance). Практики: 1–4. Цель – поднятие уровня возможности с двух до трех.
3. Фокусная область DAR (Decision Analysis and Resolution). Практики: 1–6. Цель – поднятие уровня возможности с единицы до двух.

В результате управляющих воздействий в конце планового периода (при наличии 2-го уровня зрелости) степень принадлежности к 3-му уровню зрелости возросла с 0,57 до 0,7.

Подзадача № 5.

1. Фокусная область OPF (Organization Process Focus). Практики: 1, 2, 3. Цель – поднятие уровня возможности с единицы до двух.
2. Фокусная область RD (Requirements Development). Практики: 7, 8. Цель – поднятие уровня возможности с двух до трех.
3. Фокусная область TS (Technical Solution). Практики: 1–8. Цель – поднятие уровня возможности с двух до трех.

Результаты исследований пятой подзадачи приведены на рис. 2. В результате проведения управляющих воздействий степень принадлежности к третьему уровню зрелости возросла с 0,7 до 0,725.

Таким образом, построена оптимальная программа продвижения фирмы ко второму уровню зрелости (подзадачи 1, 2, 3) и далее – к третьему уровню (подзадачи 4, 5).

Выводы. Разработана информационная технология системы поддержки принятия решений при управлении качеством процесса разработки программного обеспечения в условиях ограниченных финансовых ресурсов, которая позволяет синтезировать оптимальную стратегию продвижения организации-разработчика программного обеспечения к определенному уровню зрелости. Работоспособность разработанной информационной технологии системы поддержки принятия решений проверена на исходной информации компании «NIX Solutions».

Учитывая большую размерность задачи при полноразмерной исходной информации, дальнейшие исследования должны быть посвящены:

1. Использованию идей методов локальной оптимизации совместно с алгоритмом последовательного анализа вариантов с целью уменьшения количества возможных вариантов развития ПРПО, что приведет к уменьшению трудоемкости решения задачи;
2. Декомпозиции исходной задачи в соответствии с выбранными критериями и дальнейшей ее координации на основе общих ресурсов.

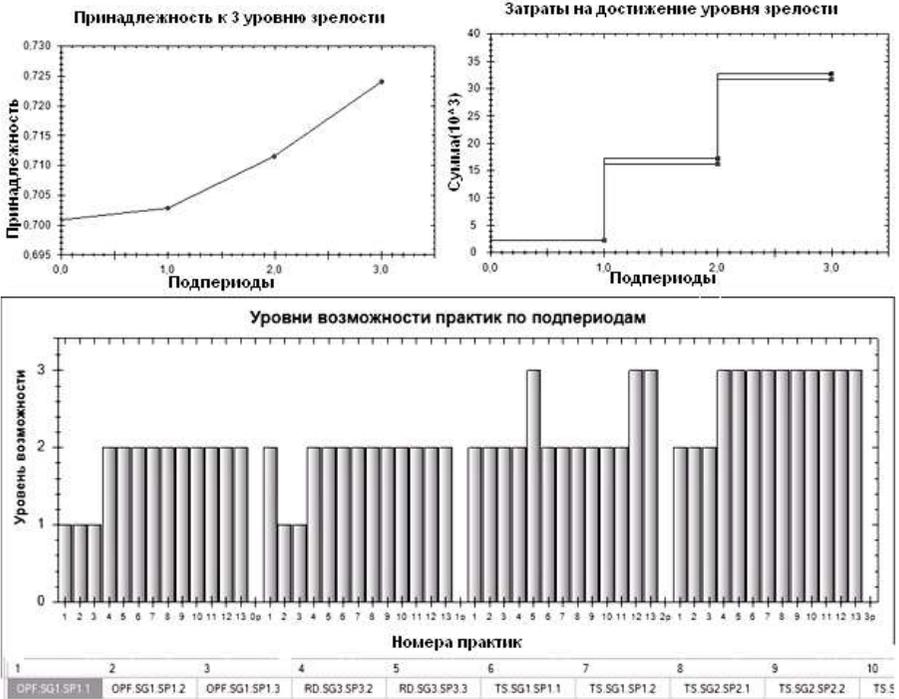


Рис. 2 – Результаты решения пятой подзадачи

Список литературы: 1. Андон, Ф. И. Основы инженерии качества программных систем. /Ф. И. Андон, Г. И. Коваль, Т. М. Коротун, Е. М. Лаврищева, В. Ю. Сулов. – К. : Академперіодика, 2007. – 672 с. 2. Годлевский, М. Д. Динамическая модель и алгоритм управления качеством процесса разработки программных систем на основе модели зрелости / М. Д. Годлевский, И. Л. Брагинский // Проблемы информационных технологий. – Херсон : ОЛДИ-Плюс, 2012. – С. 6–13. 3. Годлевский, М. Д. Принципы моделирования оценки и управления качеством процесса разработки программного обеспечения / М. Д. Годлевский, В. А. Шеховцов, И. Л. Брагинский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2012. – № 5/3(59). – С. 45–49. 4. Годлевский, М. Д. Информационная технология управления качеством процесса разработки программного обеспечения / М. Д. Годлевский, И. Л. Брагинский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2013. – № 2/9(62). – С. 63–67.

Надійшла до редколегії 04.10.2013

Результаты исследования информационной технологии управления качеством процесса разработки программного обеспечения на основе полноразмерной исходной информации / М. Д. Годлевский, И. Л. Брагинский, А. С. Бабина, Г. Г. Рычко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 62 (1035). – С.104–110. – Бібліогр.: 8 назв.

Пропонуються дані, отримані в результаті дослідження інформаційної технології управління якістю процесу розробки програмного забезпечення на основі повнорозмірної вихідної інформації.

Ключові слова: процес розробки програмного забезпечення, технологія, результати дослідження.

Are offered data obtained a result of research information technology quality management software development process based on the full original information.

Keywords: software development process, the technology, the results of research.

С. М. СЕЛЯКОВА, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Донецьк

ДВУХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЛУЧАЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕСОВ КРИТЕРИЕВ ОТ СОСТОЯНИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Рассмотрен случай многокритериальной задачи принятия решений в условиях определённости в случае зависимости оценок важности критериев от нечёткого описания состояний среды. Предложена двухуровневая модель принятия решений, позволяющая на нижнем уровне определить веса критериев, а на верхнем – решить задачу выбора наилучшей альтернативы.

Ключевые слова: задача принятия решений, нечёткий риск, вес критерия оценки, модель, спрос на продукцию.

Введение. При проектировании сложных систем, управлении технологическими процессами и производствами существенна роль методов системного анализа, которые позволяют формализовать многие возникающие проблемы как задачи принятия решений в условиях определённости и неопределённости. При этом неопределённость может проявлять себя в виде многокритериальности, статистической неопределённости, нечёткости и недостаточности информации.

Анализ литературных источников. Задачи принятия решений в зависимости от имеющейся информации о множестве альтернатив и принципе оптимальности классифицируют следующим образом [1, 2]: общая задача принятия решений (множество альтернатив и принцип оптимальности неизвестны), задача выбора (множество альтернатив известно, принцип

оптимальности неизвестен), задача упорядочения альтернатив (множество альтернатив и принцип оптимальности известны). При решении этих задач наряду с формальными методами теории принятия решений большую роль играют эвристические, неформальные и плохоформализуемые методы, использующие опыт, интуицию и ассоциативность мышления специалиста [3]. Основная проблема при решении задач принятия решений связана с многокритериальностью, с отсутствием одного признака, по которому можно упорядочить решения или выбрать лучшее. Основными способами преодоления многокритериальности является привлечение ЛПР (лица, принимающего решения) и решение задачи на основе его предпочтений [4, 5]. При этом качество процесса принятия решений находится в прямой зависимости от полноты учёта всех факторов, существенных для последствий от принятых решений. Однако часто эти факторы носят чисто субъективный характер, присущий как ЛПР, так и любому процессу принятия решений. В этих условиях элементы субъективности заметно сказываются на решении.

Как правило, при формализации постановки задач принятия решений в условиях определённости возникают трудности на этапе определения множества критериев и установлении степени важности для каждого критерия в отдельности, особенно в ситуациях, когда значимость критерия изменяется со временем или в зависимости от внешних условий. При этом если ЛПР не будет учитывать возможность изменения внешних или внутренних условий, влияющих на ранжирование критериев по важности, то это приведёт к снижению гибкости и эффективности принимаемых решений. Данная проблема особенно актуальна при автоматизированной поддержке принимаемых решений в режиме оперативного управления.

Постановка задачи моделирования. Разработать модель многокритериальной задачи принятия решений, которая позволит определить ряд приоритета критериев, зависящего от нечёткого описания состояний среды, и решить задачу выбора наилучшей альтернативы в условиях определённости.

Модель многокритериальной задачи принятия решений. С целью учёта изменения степени важности критериев в зависимости от ситуации необходимо разработать модель принятия решений, состоящую из двух уровней. Нижний уровень должен обеспечить решение задачи упорядочения альтернатив в условиях нечёткого описания состояний среды. При этом в качестве альтернатив будут выступать критерии оценки альтернатив верхнего уровня. На верхнем уровне будет решаться задача выбора наилучшей альтернативы в условиях определённости на основе составленного на нижнем уровне ряда приоритета критериев.

Проблемную ситуацию однокритериального принятия решений в условиях неопределённости, которая представлена на нижнем уровне, формально опишем следующей моделью:

– существуют альтернативы $z_k, k = 1, 2, \dots, m$ (критерии качества), которые образуют множество решений $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$, которые надо упорядочить по степени важности;

– существует множество состояний среды $S = \{s_1, \dots, s_q\}$, ЛПР точно неизвестно, в каком конкретном состоянии находится или будет находиться среда;

– на множествах решений $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$ и состояний среды $S = \{s_1, \dots, s_q\}$ определена характеристика качества, которая описывается функцией полезности $U_\xi = \|u_\xi(z_k, s_l)\|, z_k \in Z, s_l \in S$.

Как правило, неопределённость среды носит вероятностный характер. Однако во многих задачах существует дефицит информации для построения вероятностных моделей поведения среды. В этих случаях источником информации могут служить специалисты, эксперты, ЛПР. Информация, получаемая от них, носит уже не статистический характер, а характер возможностей и может быть формализована в виде нечётких описаний состояний среды. При оценке важности критериев качества возможно использование трёх моделей нечёткого поведения среды [5].

Требуется решить задачу упорядочения альтернатив по важности, т.е. составить ряд приоритета $I = \{1, \dots, m\}$. Затем на основании ряда приоритета необходимо определить весовой вектор $\bar{\gamma} = (\gamma_1, \dots, \gamma_m)$, который характеризует относительную важность k -го критерия z_k по отношению ко всем остальным критериям.

Неопределённость нечётких состояний среды преодолевается при помощи основных критериев принятия решений, к которым относятся следующие критерии: Байеса-Лапласа, минимума среднего квадратичного отклонения функции полезности, максимизации вероятности распределения функции полезности, модальный критерий и различные комбинированные критерии.

Проблемную ситуацию многокритериального принятия решений при определённости, которая представлена на верхнем уровне, зададим следующей стандартной детерминированной моделью:

– существуют альтернативы x , которые обладают m свойствами (характеристиками) z_1, \dots, z_m ;

– каждому i -му ($i = 1, \dots, m$) свойству z_i альтернативы x соответствует критериальная оценка $z_i = f_i(x)$ – локальный критерий;

– каждой альтернативе x соответствует в m -мерном критериальном пространстве Z решение (точка) $z = (z_1, \dots, z_m) = f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \in R^m$;

- каждый локальный критерий характеризуется весовым значением $\gamma_i, i = 1, \dots, m$, вычисленным на нижнем уровне принятия решений;
- альтернативы x принадлежат исходному множеству альтернатив $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, образованному ограничениями и условиями ($x \in X$);
- отображение множества X в критериальное пространство Z порождает в этом пространстве множество решений Z_X , являющееся образом множества X ;
- на множество решений в критериальном пространстве наложены критериальные ограничения, образующие подмножество Z_Z ;
- допустимое множество решений Z_D в критериальном пространстве Z образовано пересечением множеств Z_X и Z_Z ($Z_D = Z_X \cap Z_Z$).

Требуется найти альтернативу (решение) x^* , которая обеспечит значения локальных критериев, удовлетворяющие ЛПР, и для которой:

$$\max_{x \in X} f_i(x), i = 1, \dots, m, X = \{x : x \in \Omega, g_j(x) \geq b_j, j = 1, \dots, L\} \quad (1)$$

где $f_i(x)$ – локальные критерии, значения которых вычисляются по моделям или получены в результате измерений или с помощью экспертных оценок; $g_j(x) \geq b_j, j = 1, \dots, L$ – функции ограничений, определяющих допустимую область X многокритериальной задачи; Ω – исходное множество альтернатив.

Поставленная задача имеет решение только в одном случае, когда минимум всех m критериев достигается в одной точке. Обычно критерии являются противоречивыми и поэтому для устранения неопределённости, связанной с многокритериальностью, необходимо использование принципов оптимальности, которые обеспечивают способы сравнения решений в пространстве критериев или применение методов для поиска компромиссных решений.

Пример постановки двухуровневой задачи принятия решений. В качестве примера постановки и решения двухуровневой задачи принятия решений рассмотрим задачу выбора лучшего варианта действий для предприятия с целью увеличения спроса на свою продукцию в различных условиях конкуренции (s_1 – сильная конкуренция на рынке ($\mu_1 = 0,4$); s_2 – средний уровень конкуренции ($\mu_2 = 0,8$); s_3 – слабая конкуренция ($\mu_3 = 0,2$). К альтернативным действиям отнесены следующие: изменить технологию (x_1), модернизировать существующую технологию (x_2), понизить цену, не повышая качество продукции (x_3), повысить затраты на рекламу (x_4), изменить упаковку и оформление продукции (x_5).

Критерии, по которым оцениваются результаты действий, включают: увеличение объёма продаж в процентах (y_1); увеличение размера капиталовложений в тысячах гривен (y_2); повышение качества продукции в процентах (y_3); повышение затрат на производство в тысячах гривен (y_4).

Экспертами была проведена покритериальная оценка каждой из альтернатив, результаты которой приведены в табл. 1. Оценка важности критериев экспертами для различных конкурентных условий задана в виде табл. 2.

Таблица 1 – Оценка результатов действий для предприятия

Критерии	Альтернативы				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y_1	20	15	18	24	10
y_2	150	120	0	50	20
y_3	40	35	0	0	0
y_4	10,6	7,5	0	0	0

Таблица 2 – Оценка важности критериев в зависимости от условий конкуренции

Критерии	Вариант внешних условий конкуренции		
	s_1	s_2	s_3
y_1	100	100	100
y_2	50	75	95
y_3	90	80	60
y_4	55	70	90

Требуется выбрать лучший вариант действия для предприятия, который обеспечит высокий уровень спроса на продукцию в различных условиях конкуренции.

Решение задачи. Таким образом, на нижнем уровне принятия решений необходимо решить задачу определения весов критериев в зависимости от условий конкуренции, а на верхнем – задачу выбора лучшего варианта действий.

Нижний уровень. В данной задаче используется модель первого нечёткого состояния среды. Поэтому для её решения применим критерии Байеса-Лапласа для функции полезности U_i следующего вида:

$$B_i(\mu, y_k) = \frac{\sum_{l=1}^q \mu_l u_l(y_k, s_l)}{\sum_{l=1}^q \mu_l}. \quad (2)$$

Результаты вычислений значений критерия и весовых значений критериев приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты решения задачи нижнего уровня

Критерии	Вариант внешних условий конкуренции			$B_i(\mu, y_k)$	γ_i
	s_1	s_2	s_3		
y_1	100	100	100	100	0,3
y_2	50	75	95	70,7	0,25
y_3	90	80	60	80	0,25
y_4	55	70	90	68,6	0,2

Верхний уровень. На основании найденных весов критериальных оценок альтернатив необходимо решить задачу выбора наилучшей альтернативы в условиях определённости.

Однако критерии оценки альтернатив измеряются в разных единицах, шкалах, поэтому, чтобы сравнить значения разных критериев, необходимо перейти к однонаправленным шкалам и выразить их значения в одинаковых абсолютных единицах.

Для преобразований значений критериев будем использовать операции смены направленности цели и полной нормализации критериев, которая задаётся следующей формулой:

$$z_i = \frac{\overline{z_i} - \min_{x \in \Omega} \overline{z_i}}{\max_{x \in \Omega} \overline{z_i} - \min_{x \in \Omega} \overline{z_i}}, \quad (3)$$

где z_i – нормализованная величина, $\overline{z_i}$ – исходная величина критерия.

Для решения задачи применим принцип идеальной точки, согласно которому лучшим считается решение, расположенное в пространстве параметров ближе всего к «идеальной точке» z^I .

Для евклидовой нормы будем использовать следующую формулу:

$$x^* = \arg \min_{x \in X} \sum_{i=1}^m \gamma_i^2 \cdot (z_i^I - z_i)^2. \quad (4)$$

В нашем случае идеальной точкой является точка $z^I = (1,1,1,1)$. Результаты нормализации и расчётов по формуле (4) приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты решения задачи верхнего уровня

Альтернативы	Критерии				$\sum_{i=1}^4 \gamma_i^2 \cdot (z_i^I - z_i)^2$
	y_1	y_2	y_3	y_4	
x_1	0,71	0	1	0	0,110
x_2	0,36	0,2	0,88	1	0,08
x_3	0,57	1	0	0	0,12
x_4	1	0,67	0	0	0,112
x_5	0	0,87	0	0	0,14

Таким образом, наилучшей альтернативой по принципу идеальной точки является альтернатива x_2 – модернизировать существующую технологию, значение нормы для которой минимально.

Выводы. Представление многокритериальной задачи принятия решений в виде двухуровневой модели принятия решений позволяет выбрать наилучшую альтернативу из множества решений с учётом зависимости уровня важности критериев от нечёткого описания состояний среды. Применение предложенной модели для формализации и решения задач принятия решений в условиях определённости обеспечивает получение более точных и адекватных решений за счёт применения методов принятия решений при нечётком риске с целью формирования ряда приоритета критериев в ситуациях, где важность критериев меняется в зависимости от состояний внешней среды.

Список литературы: 1. Козлов В. Н. Системный анализ и принятие решений / Козлов В. Н. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2000. – 190 с. 2. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений / Ларичев О. И. – М. : Логос, 2000. 3. Черноуцкий И. Г. Методы принятия решений / Черноуцкий И. Г. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416с. 4. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде / Ногин В. Д. – М. : Физматлит, 2002. 5. Рыков А. С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация: Учебное пособие для вузов / Рыков А. С. – М. : МИСИС, Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 352 с.

Надійшла до редколегії 11.11.2013

УДК 004.02

Двухуровневая модель принятия решений в случае зависимости весов критериев от состояний внешней среды / С. М. Селякова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 111–127. – Бібліогр.: 5 назв.

Розглянуто випадок багатокритеріальної задачі прийняття рішень в умовах визначеності у випадку залежності оцінок важності критеріїв від нечіткого опису станів середовища.

Запропонована дворівнева модель прийняття рішень, що дозволяє на нижньому рівні визначити вагу критеріїв, а на верхньому – розв’язати задачу вибору найкращої альтернативи.

Ключові слова: задача прийняття рішень, нечіткий ризик, вага критерію оцінки, модель, попит на продукцію.

The case of a multicriteria problem of decision-making in the conditions of definiteness in case of dependence of estimates of importance of the fuzzy description criteria on the environment conditions is considered. The two-level model of decision-making allowing at the bottom level to define of weight of criteria is offered, and on the top – to solve a problem of a choice of the best alternative.

Keywords: problem of decision-making, fuzzy risk, the weight of criterion of an assessment, the model, the demand for products.

УДК 004.822

С. В. ПЕТРАСОВА, аспірант НТУ «ХПИ»;
З. А. КОЧУЕВА, ст. препод. НТУ «ХПИ»;
Н. Ф. ХАЙРОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЭКСТРАКЦИИ ПАРАДИГМАТИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ПОНЯТИЯМИ ТОЛКОВОГО СЛОВАРЯ

В статье рассматривается метод автоматического выявления семантических парадигматических отношений между концептами толкового словаря. Для выявления межконцептуальных отношений принадлежности к классу, гиперонимии, гипонимии и меронимии использованы шаблоны лексических последовательностей; для определения семантической эквивалентности вычисляется мера смысловой близости. Описана разработанная программная реализация метода и приводятся экспериментально определенные показатели качества работы.

Ключевые слова: семантические отношения, межконцептуальные отношения, смысловая близость, толковый словарь.

Введение. В настоящее время, в связи со стремительным ростом объемов информационных ресурсов, все большую актуальность приобретают задачи систематизации и обработки информации. Активно проводятся работы по извлечению данных из текстов и формальному выражению знаний, что приводит к возможности эффективного использования интеллектуальных информационных систем, основанных на знаниях.

Сегодня наиболее перспективным способом формального выражения знаний является семантическая сеть. Это обусловлено, прежде всего, наглядностью представления знаний и возможностью явного выражения семантических отношений между понятиями [1]. Семантические сети используются как приложение лингвистического процессора в информационно-поисковых системах, а также в других системах обработки естественного языка для расширения электронных тезаурусов и онтологий.

© С. В. Петрасова, З. А. Кочуева, Н. Ф. Хайрова, 2013

Но, несмотря на достаточно широкое использование данного способа представления знаний, его распространение сдерживается как неоднозначностью выражения знаний на естественном языке, так и трудоемкостью и сложностью разработки семантических сетей.

Существующие семантические сети (например, ConceptNet, Lexipedia, WiSeNet и др.) в своем подавляющем большинстве разрабатываются экспертами той или иной предметной области, что требует значительных временных и интеллектуальных затрат. Основная проблема, не позволяющая до настоящего времени автоматизировать разработку семантической сети, заключается в сложности формализации семантических отношений между понятиями.

Сегодня для решения задачи выявления семантических отношений в слабоструктурированной текстовой информации используют: терминологические шаблоны, индикаторы связи и профили кластеризуемости [2]; шаблоны между каждой парой объектов в сегменте текста [3]; машины опорных векторов, оснащенные языковыми ориентированными ядрами для классификации пар объектов [4]; условные случайные поля [5] и др.

Постановка задачи исследования. В работе предлагается в качестве источника выявления парадигматических семантических отношений между понятиями использовать толковый словарь. Толковые словари на сегодня являются наиболее концентрированными средствами представления и накопления знаний, выраженных в форме текста.

Поскольку словарные статьи глоссария (или толкового словаря) достаточно часто содержат отношения концептов, выраженные в явном виде, то в этом случае их можно определять с помощью шаблонов лексических последовательностей. Однако отношения семантической эквивалентности не всегда представлены в явном виде, поэтому в этом случае необходимо применять методы, основанные на измерении смысловой близости лингвистических единиц.

Цель исследования. Целью данной работы является разработка метода формализации семантических парадигматических отношений между понятиями глоссария. Использование данного метода позволяет автоматизировать построение элементов семантической сети предметной области за счет автоматической обработки слабоструктурированной текстовой информации.

Метод построения семантической сети. Предлагаемый метод автоматизированного построения семантической сети заключается в пошаговом анализе текста. На начальном этапе анализа происходит извлечение концептов, т.е. выявление ключевых слов, словосочетаний и их группировка. Процесс группировки включает:

- нормализацию (приведение каждого слова к его нормальной форме – лемме);
- фильтрацию на основе лингвистического обеспечения (устранение стоп-слов, имен собственных, цифр и т.п.);

- ранжирование с использованием статистической информации.

В данном исследовании предлагается метод автоматизированного построения фрагмента семантической сети на базе использования знаний толкового словаря английского языка. В данном информационном ресурсе ключевыми словами и словосочетаниями являются термины словаря, которые и будут представлять собой концепты семантической сети.

Вторым необходимым этапом построения семантической сети является определение межконцептуальных связей. В разрабатываемой сети выделяемыми отношениями концептов являются: семантическая эквивалентность, принадлежность к классу, отношения гиперонимии, гипонимии и меронимии.

Одним из наиболее сложных для формализации отношений между концептами является отношение семантической (смысловой) эквивалентности. Проведенный анализ существующих статистических методов выявления семантических эквивалентов (метод формирования многомерных векторных представлений слов [6], латентно-семантический анализ [7], метод Клайнберга [8]), а также семантических методов, основанных на использовании онтологий, показал недостаточную полноту и точность получаемых результатов.

В исследовании предлагается использовать метод расстояний, с помощью которого определяется мера семантической близости между семантическими эквивалентами. При этом под семантическими эквивалентами мы понимаем текстовые выражения, сопоставленные одному и тому же понятию, а также слова и словосочетания с близким значением, встречающиеся в одном контексте. Метод расстояний, комбинируя статистическую и семантическую составляющие, позволяет дать количественную оценку смысловой близости между терминами толкового словаря. Данная величина формально определяется дефинициями глоссариев как отношение мощностей множеств, образованных теоретико-множественным пересечением и объединением множеств терминов дефиниций [9]:

$$f(t', t'') = \frac{2 \times N(x_1 \cap x_2)}{N(x_1 \cup x_2)}, \quad (1)$$

где $f(t', t'')$ – величина семантической близости между концептами t' и t'' ;

x_1, x_2 – дефиниции лингвистических единиц толкового словаря t' и t'' ;

$N(x_1 \cap x_2)$ – количество общих слов в определениях концептов t' и t'' ;

$N(x_1 \cup x_2)$ – количество всех слов в определениях концептов t' и t'' .

Например, для вычисления меры семантической близости между терминами $t' = \text{“computer language”}$ и $t'' = \text{“interpreted language”}$ определим количество общих слов в соответствующих дефинициях:

x_1 = an artificial language that specifies instructions to be executed on a computer;

x_2 = an artificial language in which instructions are translated into executable form.

Определенная согласно формуле (1) мера семантической близости $f(t', t'')$ концептов $t' = \text{"computer language"}$ и $t'' = \text{"interpreted language"}$ составляет 67%. Данный показатель находится в диапазоне 30-100%, предварительно определенный экспериментальным путем как допустимый диапазон семантической эквивалентности, т.е. рассматриваемые концепты "computer language" и "interpreted language" будут определены как семантические эквиваленты.

Для формализации таких межконцептуальных отношений, как классификация, гиперонимия, гипонимия и меронимия, применяются шаблоны лексических последовательностей:

$$NN_1 \rightarrow Rel_z \rightarrow NN_2,$$

где NN_1 и NN_2 – связанные концепты, представленные ключевыми словами и словосочетаниями толкового словаря, Rel – лексические цепочки, выражающие отношения z :

z =отношение классификации, $Rel = \{\text{"meaning of"}, \text{"identification of"}, \text{"is a"}\}$.

z =отношение гиперонимии, $Rel = \{\text{"group of"}, \text{"class of"}, \text{"set of"}, \text{"list of"}, \text{"collection of"}\}$.

z =отношение гипонимии, $Rel = \{\text{"branch of"}, \text{"type of"}, \text{"version of"}, \text{"study of"}\}$.

z =отношение меронимии, $Rel = \{\text{"part of"}, \text{"component of"}, \text{"subset of"}, \text{"member of"}\}$.

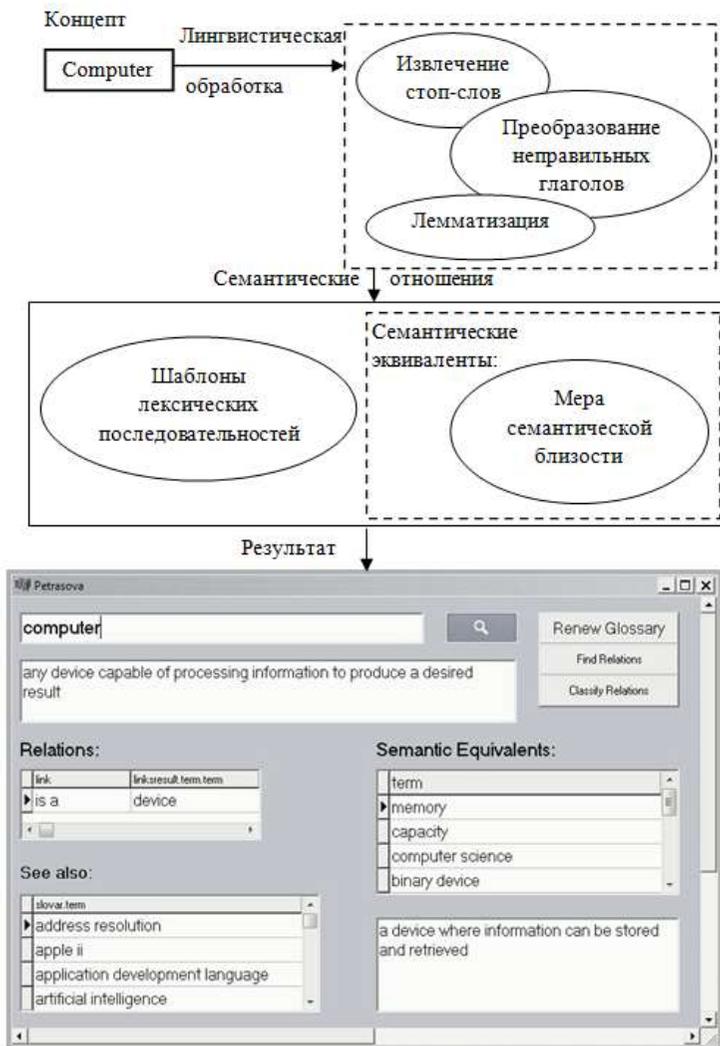
Программная реализация предложенного метода. Все вышеприведенные этапы построения семантической сети программно реализованы в приложении, позволяющем выявлять парадигматические отношения между концептами толкового словаря Microsoft Computer Dictionary [10].

На первом этапе проводится лингвистическая обработка лексем в дефинициях концептов глоссария, заключающаяся в лемматизации, удалении стоп-слов, преобразовании неправильных глаголов. На следующем этапе происходит поиск и классификация семантических отношений между концептами толкового словаря с помощью шаблонов лексических последовательностей.

После проведенной обработки словарных статей глоссария для каждого запрашиваемого пользователем концепта вычисляется мера семантической близости с остальными концептами, в соответствии с которой определяется

отношение семантической эквивалентности между рассматриваемыми концептами (см. рисунок).

Экспериментальные результаты. Для оценки качества созданной подсистемы автоматической экстракции парадигматических отношений между понятиями толкового словаря использовались метрики, характеризующие деятельность пользователей до и после внедрения данного метода.



Информационно-лингвистическое обеспечение автоматической экстракции парадигматических отношений между концептами толкового словаря

Для определения коэффициентов точности – precision и полноты – recall вычисляем отношение правильно определенных системой связей выбранного концепта (термина словаря) – n_{yy} к общему количеству определенных связей – $n_{yy} + n_{yn}$ (2) и количество верно определенных связей – n_{yy} к общему числу интеллектуально определенных связей данного концепта – $n_{yy} + n_{ny}$ (3):

$$precision = \frac{n_{yy}}{n_{yy} + n_{yn}}, \quad (2)$$

$$recall = \frac{n_{yy}}{n_{yy} + n_{ny}}. \quad (3)$$

Для определения качества разработанного программного обеспечения исследовалась выборка из ста терминов-запросов. В результате эксперимента было определено 130 межконцептуальных отношений, агрегируемых в отношения принадлежности к классу, гиперонимии, гипонимии и меронимии, и 706 семантических эквивалентов.

Полученный средний коэффициент полноты recall=1. Система выделяет все связи концептов, определенные интеллектуально экспертом. Средний коэффициент точности, показывающий правильность определения семантических связей, precision=0,9201. Коэффициент шума, определяющийся отношением числа неправильно определенных системой связей к общему числу связей, выданных системой, error=0,0771.

Данные показатели являются начальным результатом и в дальнейшей разработке должны быть учтены для повышения качества работы системы, осуществляющей автоматизированное построение элементов семантической сети.

Выводы. Неоднозначность толкования и представления естественного языка является характерной особенностью текстовых ресурсов, не позволяющей однозначно формализовать извлечение концептов и межконцептуальных отношений из текстов. В работе рассмотрен метод автоматической экстракции парадигматических отношений между понятиями, основанный на использовании толкового словаря как естественно-языкового текста, наиболее полно концентрирующего знания.

Для выявления межконцептуальных отношений принадлежности к классу, гиперонимии, гипонимии и меронимии использовались шаблоны лексических последовательностей; а для определения семантической эквивалентности вычислялась мера смысловой близости лингвистических единиц глоссария.

Проведенный эксперимент показал приемлемость значений коэффициентов качества работы программной реализации данного метода. Разработан-

ная программа может быть применена в качестве составляющей системы автоматизированного построения элементов семантической сети.

Список литературы: 1. Маннинг К. Д. Введение в информационный поиск / К. Д. Маннинг, П. Рагхаван, Х. Шютце; пер. с англ. – М. : ООО "И.Д.Вильямс", 2011. – 528 с. 2. Саломатина Н. В. О возможностях автоматизации выявления связей между терминами предметной области (на примере катализа) / Н. В. Саломатина, В. Д. Гусев, Л. Ю. Ильина [и др.] // Труды междунар. конф. «Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии» (Диалог-2010). – М. : Наука, 2010. – С. 430–436. 3. Hasegawa T. Discovering relations among named entities from large corpora / T. Hasegawa, S. Sekine, R. Grishman // In Proc. of ACL, 2004. 4. Bunescu R. Learning to extract relations from the web using minimal supervision / R. Bunescu, R. Mooney // In Proc. of ACL, 2007. 5. Culotta A. Integrating probabilistic extraction models and data mining to discover relations and patterns in text / A. Culotta, A. McCallum, J. Betz // In Proc. of HLT/NAACL, 2006. – р. 296–303. 6. Мисуню И.С. Векторные и распределенные представления, отражающие меру семантической связи слов / И. С. Мисуню, Д. А. Рачковский, С. В. Слишченко // Математические машины и системы. – 2005. – № 3. – С. 50–66. 7. Митрофанова О. А. Семантические расстояния: проблемы и перспективы / О. А. Митрофанова // Материалы XXXIV междунар. филолог. конф. Вып. 21. Секция прикладной и математической лингвистики. – СПбГУ, 2005. 8. Kleinberg J. Authoritative sources in a hyperlinked environment / J. Kleinberg // Proc. 9th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, 1999. 9. Федорченко Л. А. Метод автоматизированного построения семантической сети терминов учебной дисциплины / Л. А. Федорченко, Н. Ф. Хайрова, А. И. Довнар [и др.] // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 4 (52). – С. 1–7. 10. Microsoft Computer Dictionary / [edited by Alex Blanton]. – 5-th Ed. – Microsoft Press, 2012. – 656 p.

Надійшла до редколегії 11.11.2013

УДК 004.822

Метод автоматической экстракции парадигматических отношений между понятиями толкового словаря / С. В. Петрасова, З. А. Кочуева, Н. Ф. Хайрова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 62 (1035). – С. 118. – 124. – Бібліогр.: 10 назв.

У статті розглядається метод автоматичного виявлення семантичних парадигматичних відношень між концептами тлумачного словника. Для виявлення міжконцептуальних відношень приналежності до класу, гіперонімії, гіпонімії та меронімії використані шаблони лексичних послідовностей; для визначення семантичної еквівалентності обчислюється міра смислової близькості. Описана розроблена програмна реалізація методу і наводяться експериментально визначені показники якості роботи.

Ключові слова: семантичні відношення, міжконцептуальні відношення, смислова близькість, тлумачний словник.

In this article, the method of the automatic identification of semantic paradigmatic relations between concepts of the glossary has been considered. Patterns of lexical sets have been used for the identification of concepts' relations of belonging to the class, hypernymy, hyponymy and meronymy. A measure of the semantic proximity has been determined for the identification of the semantic equivalence. The developed software implementation has been described and the quality indexes experimentally determined have been produced.

Keywords: semantic relations, concepts' relations, semantic proximity, glossary.

О. С. МІНЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, проф., ДонНТУ, Донецьк;
А. Т. ХАЗІЄВА, магістрант ДонНТУ, Донецьк

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИДІВ ПЕРЕСТРАХУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРЕСТРАХОВОГО ЗАХИСТУ ПОРТФЕЛЯ СТРАХОВОЇ КОМПАНІЇ

Проведено дослідження існуючих видів перестрахування. Здійснено аналіз переваг та недоліків пропорційних і непропорційних видів перестрахування. Виділено три рівні перестрахування для створення системи оптимального захисту портфеля страхової компанії. Проведено чисельне дослідження на нижньому рівні.

Ключові слова: види перестрахування, пропорційне і непропорційне перестрахування, трьохрівнева система.

Постановка проблеми. Кожна страхова організація прагне до створення стійкого, стабільного страхового портфеля, який складався б з можливо більшої кількості страхових договорів, але з невисоким ступенем відповідальності по кожному прийнятому ризику. Рівень прийнятих ризиків повинен відповідати фінансовим можливостям страхової організації, щоб при настанні страхового випадку або ряду випадків виплата страхового відшкодування по збитках не відображалася на її фінансовому положенні.

Разом з тим жорстка конкуренція на страховому ринку не дає можливості для вільного відбору сприятливих ризиків, тому у портфелі страхової організації можуть виявитися ризики з надмірно високою відповідальністю при яких настання лише однієї певної події може виявитися катастрофічним для організації, що не має в своєму розпорядженні необхідних коштів.

Для захисту себе від можливих фінансових ускладнень страховики вдаються до передачі прийнятих ними ризиків за допомогою інституту перестрахування іншим страховикам. Зміст перестрахування полягає у передачі частини ризику (ризиків) у відповідальність іншому спеціалізованому страховику, тобто перестраховику за певну плату.

Аналіз літератури. Проблеми ринку перестрахування та його розвиток в Україні досліджені в працях О. В. Козьменко [2], А. О. Бойко [3], А. Н. Залетов [4], Н. В. Ткаченко [5] та інших дослідників. Проте інтеграція вітчизняного страхового ринку в європейський ринок страхування потребує визначення подальших напрямків розвитку ринку перестрахування в Україні та з'ясування його економічно-соціальних пріоритетів для держави в цілому.

Дослідження. Метою дослідження є аналіз видів перестрахування та створення системи оптимального перестрахового захисту портфеля страхової компанії.

Для її досягнення було проведено дослідження видів перестраховування, яке дозволило класифікувати їх за [1]:

- способом дії – на активне (передача ризиків в перестраховування) і пасивне (прийняття ризиків на перестраховування);
- розміщенням ризиків – на вітчизняне і зарубіжне;
- методом передачі ризиків – на факультативне (добровільне), облігаторне (обов'язкове) і факультативно–облігаторне (змішане);
- видами договорів (формами здійснення) – на пропорційне (квотні договори, договори ексцеденту суми і квотно–ексцедентні договори) і непропорційне (договори ексцеденту збитку і ексцеденту збитковості).

Було проаналізовано переваги та недоліки пропорційних і непропорційних видів перестраховування. Для створення системи оптимального захисту портфеля страхової компанії було виділено три рівні:

- нижній рівень – перестраховування по кожному договору;
- середній рівень – перестраховування по кожному виду страхування;
- верхній рівень – перестраховування портфеля страхової компанії.

На нижньому рівні ефективними методами перестраховування є квотні договори, ексцеденту сум та їх комбінації, які дозволяють уникнути великих виплат за одним договором.

При квотному виді перестраховування дохід цедента за одним договором становить:

$$sp_{ij}' = (1 - q) * sp_{ij}, \quad (1)$$

де sp_{ij}' – дохід цедента;

sp_{ij} – дохід за одним договором;

q – частка участі перестраховика (квота).

Зауважимо, що частка участі q фіксована заздалегідь укладеним договором.

Дохід за одним договором визначається формулою:

$$sp_{ij} = ss_{ij} * tar_{ij}, \quad (2)$$

де ss_{ij} – страхова сума;

tar_{ij} – тариф страхової компанії, який встановлюється на підставі статистичних даних.

З умов перестраховування методом ексцеденту сум дохід цедента за одним договором дорівнює:

$$sp'_{ij} = \begin{cases} sp_{ij}, ss_{ij} < a, \\ sp_{ij} * \frac{a}{ss_{ij}}, a \leq ss_{ij} \leq b, \\ sp_{ij} * \frac{ss_{ij} - (b - a)}{ss_{ij}}, ss_{ij} > b, \end{cases} \quad (3)$$

де a – нижній ліміт перестраховування;

b – верхній ліміт перестраховування.

Управління перестраховуванням на нижньому рівні забезпечує захист по кожному окремому договору, однак, можлива ситуація, коли страхові виплати настають масово, за одним видом страхування. Щоб захистити страхову компанію від значних збитків, необхідно здійснювати перестраховування сукупності договорів одного виду.

На середньому рівні для уникнення збитків, пов'язаних з великою кількістю страхових виплат за договорами, обґрунтованим є використання договорів ексцеденту збитків.

Дохід цедента за i видом страхування після перестраховування становить:

$$SP'_i = \begin{cases} SP_i, SS_i < A, \\ SP_i * \frac{A}{SS_i}, SS_i > A, \end{cases} \quad (4)$$

де SP'_i – дохід цедента за i видом страхування;

SP_i – загальний розмір страхових премій за i видом страхування;

SS_i – загальний розмір страхових сум за i видом страхування;

A – перестраховий ліміт.

Загальний розмір страхових премій має вигляд:

$$SP_i = \sum_{j=1}^{n_i} sp_{ij}. \quad (5)$$

Управління перестраховуванням на середньому рівні забезпечує захист за окремим видом страхування, однак, можлива ситуація, коли страхові події настають масово за кількома видами страхування. В такому випадку страховій компанії загрожує розорення, тому необхідно здійснювати перестраховування страхового портфелю.

На верхньому рівні захист здійснюється не з метою максимізації прибутку, а щоб захистити страхову компанію від розорення.

Перестраховування здійснюється, коли ймовірність розорення страхової компанії перевищує 5%:

$$p\left(\sum_{i=1}^N SV_i > K + \sum_{i=1}^N SP_i\right) \geq 0,05, \quad (6)$$

де $SV = \sum_{i=1}^N SV_i$ – сукупний розмір страхових виплат за N видами страхування;

$SP = \sum_{i=1}^N SP_i$ – сукупний розмір зібраних страхових премій за N видами страхування;

K – капітал страхової компанії.

Згідно з центральною граничною теоремою, ймовірність розорення страхової компанії може бути представлена у вигляді:

$$p\left(\sum_{i=1}^N SV_i > K + \sum_{i=1}^N SP_i\right) \approx 1 - \Phi\left(\frac{(K + \sum_{i=1}^N SP_i) - N * M(SV_i)}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^N SV_i)}}\right) = 0,05. \quad (7)$$

Для більш компактного запису введемо позначення для аргументу функції Лапласа:

$$\frac{(K + \sum_{i=1}^N SP_i) - N * M(SV_i)}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^N SV_i)}} = Q. \quad (8)$$

Таким чином, перестраховування на верхньому рівні управління застосовується, коли значення $Q < 1,96$.

Результати дослідження. На нижньому рівні було проведено чисельне дослідження на основі статистичних даних з автомобільного виду страхування КАСКО страхової компанії «АХА Страхование».

Проведене дослідження полягало в тому, щоб простежити залежність прибутку страхової компанії–цедента від різних значень квоти або перестраховального лейера (лімітів a і b) та вибрати оптимальне.

Чисельне дослідження показало, що кращім видом перестраховування є квотне перестраховування.

Висновки. Було здійснено дослідження існуючих видів перестраховування, проаналізовано переваги та недоліки пропорційних і непропорційних

видів перестрахування та, на підставі цього, для створення системи оптимального захисту портфеля страхової компанії було виділено три рівні: нижній, середній та верхній. Проведене чисельне дослідження на нижньому рівні показало, що дуже важливим фактором є визначення оптимальних умов для різних видів перестрахування. Під умовами перестраховального договору маються на увазі значення перестраховальних лімітів (границь). Тому подальше завдання дослідження полягає у визначенні таких значень лімітів, щоб прибуток був максимальним і при цьому реалізовувалося певне значення збитковості.

Список літератури: 1. *Базилевич В. Д.* Страховий ринок України / *В. Д. Базилевич.* – К. : Знання, 1998. – 374 с. 2. *Козьменко О. В.* Аналіз структури ринку перестрахування в Україні, перестрахування екологічних ризиків / *О. В. Козьменко* // *Фінанси, облік і аудит : збірник наукових праць.* – К., 2009. – Вип. 13. – С. 62–69. 3. *Бойко А. О.* Сучасні тенденції розвитку ринку перестрахування в Україні / *А. О. Бойко* // *Актуальные проблемы и перспективы развития экономики Украины : сборник тезисов выступлений VIII Международной научно-практической конференции (1–3 октября 2009 г.) / Таврический Национальный Университет им. Вернадского В. И. – Алушта, 2009. – С. 114–115.* 4. *Залетов А. Н.* Перестрахование в условиях глобализации мировой экономики / *А. Н. Залетов* // *Insurance Top.*– 2008. – № 4. – С. 7–18. 5. *Ткаченко Н. В.* Проблеми та перспективи розвитку професійних перестраховиків в Україні / *Н. В. Ткаченко* // *Світ фінансів.* – 2007. – № 4. – С. 129–134.

Надійшла до редколегії 15.11.2013

УДК 368.86

Дослідження видів перестрахування та розробка системи оптимального перестрахового захисту портфеля страхової компанії / О. С. Міненко, А. Т. Хазієва // *Вісник НТУ «ХП».* Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 62 (1035). – С. 125–129. – Бібліогр.: 7 назв.

Проведено исследование существующих видов перестрахования. Осуществлен анализ преимуществ и недостатков пропорциональных и непропорциональных видов перестрахования. Выделены три уровня перестрахования для создания системы оптимальной защиты портфеля страховой компании. Проведено численное исследование на нижнем уровне.

Ключевые слова: виды перестрахования, пропорциональное и непропорциональное перестрахование, трехуровневая система.

A study of existing types of reinsurance performed. The advantages and disadvantages of proportional and disproportional types of reinsurance analysed. Three levels of re-establishing a system for optimal protection of the portfolio of the insurance company distinguished. A numerical study on the lower level performed.

Keywords: types of reinsurance, proportional and disproportional reinsurance, three-level system.

О. А. ШЕВЧУК, асп. ДонНТУ, Донецк

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Статья посвящена формализации процесса планирования деятельности строительного-монтажных организаций (СМО), которая позволит разработать систему принятия решений при планировании деятельности строительного предприятия. Проведен анализ строительного-монтажной организации как объекта управления, описаны уровни управления СМО, сформированы функционалы цели.

Ключевые слова: формализация процесса планирования, строительный-монтажная организация.

Постановка проблемы. Повышение экономической эффективности деятельности строительного-монтажной организации.

Анализ литературных источников. Процессы планирования и контроля, планово-контрольные расчеты, системы планирования и контроля рассматриваются в [1]. В этой работе, ориентированной на долгосрочное видение диалогового управления, предусматривается комплексный учет современных разработок и нормативов к ведению строительных работ, предусматривающих требования современного рынка и повышения оборачиваемости средств, вкладываемых в производство.

В [2] рассмотрены методологические аспекты проблемы управления деятельностью строительного предприятия. В работе сделан акцент на оптимизацию деятельности строительного производства согласно новым условиям хозяйствования, разработку рыночных стратегий.

Вопросы, связанные с моделированием строительного производства, частично рассмотрены в [3].

Постановка задачи. Определить функциональные связи системы принятия решений при планировании деятельности строительного-монтажной организации и осуществить постановку задач планирования.

Изложение основного материала. Для реализации поставленной задачи необходимо:

- провести анализ и описать структурные уровни управления СМО;
- осуществить физическую и формальную постановку задач на каждом уровне управления.

При анализе характеристик строительного-монтажной организации как объекта управления выделяются: структура предприятия; специфика портфеля заказов; классы и виды выполняемых работ; технические средства, используемые при выполнении работ.

Исследование организационной структуры строительного-монтажной организации как объекта управления позволило выделить основные функциональные задачи предприятия. На основании этого в управлении строительным производством определены режимы планирования, учета и оперативного управления. В данной работе рассматривается задача планирования деятельности строительного-монтажной организации.

Планирование работ, выполняемых строительным предприятием, осуществляется на двух уровнях:

- верхний уровень – СМО, как юридическое лицо;
- нижний уровень – производственные подразделения [4,5].

При планировании на верхнем уровне необходимо формально представить график выполнения этапов строительства, исходными данными для которого являются позиции портфеля заказов.

На нижнем уровне требуется формально представить особенности выполнения работ по каждому этапу строительства.

В основе формирования портфеля заказов лежат порядок получения и обработки договоров строительства.

Любой договор d_m можно записать совокупностью его показателей:

$$d_m = (d_{1m}, d_{2m}, d_{3m}, d_{4m}, d_{5m}, d_{6m}), \quad (1)$$

где m – номер договора ($m = \overline{1, M}$);

d_{1m} – объект строительства;

d_{2m} – размер договорной цены;

d_{3m} – дата заключения договора;

d_{4m} – сумма оплаты;

d_{5m} – условия оплаты;

d_{6m} – дата сдачи объекта в эксплуатацию.

Для определения однотипных работ по портфелю осуществлена классификация объектов строительства. В соответствии с признаками однородности (по количеству этажей, по наличию каркаса, в зависимости от материалов и деталей, из которых должны сооружаться объекты), все объекты строительства разделены на классы.

Логико-формальное представление k -го класса объектов:

$$B^k = \bigcap_{l,t} B_{l,t}, l = \overline{1, 3}, t = \overline{1, T}, \quad (2)$$

где $B_{l,t}$ – признак однородности, характеризующий здания и сооружения. В приведенной классификации первый индекс l определяет подкласс по признаку, t – характеризует составляющие подкласса.

В соответствии с исходными данными объекта строительства и его особенностями выделяются строительно-монтажные работы (СМР) строительства R_i ($i = \overline{1,17}$) [6]. По каждому объекту строительства в зависимости от сложности и технологических особенностей производится укрупнение работ по этапам.

Представим классификацию этапов в общем виде следующим образом:

E^1 – подготовительные работы;

E^2 – земляные работы и фундамент;

E^3 – монтажные работы;

E^4 – инженерные сети и коммуникации;

E^5 – отделочные работы и монтаж технологического оборудования;

E^6 – благоустройство территории и сдача объекта в эксплуатацию.

При выполнении этапов используется строительная техника и механизмы. В соответствии с этим выделено множество групп техники

$$ZagrT = \bigcup_{g=1}^{13} ZagrT_g .$$

Так как объемы СМР объектов, составляющих портфель заказов СМО, предусматривают длительные сроки выполнения и завершения работ по объектам, рассмотрены задачи планирования работ на год, квартал, месяц.

Физическая постановка задачи планирования на год заключается в следующем: очередность выполнения этапов работ по классам, сопутствующие им доходы и расходы таким образом, чтобы валовая прибыль СМО была максимальной.

В общем виде **формальная постановка задачи планирования на год** представлена функционалом вида

$$I_1 = F_1(\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, D_{op}^{ood}, RhP^{ood}) \rightarrow \max_{E^k, T^k} , \quad (3)$$

где I_1 – валовая прибыль предприятия за год;

$\mathbf{Y}_1 = \{E^{jk}\}$ – совокупность этапов по классам объектов;

j – номер этапа строительства, $j = \overline{1,6}$;

k – номер класса объектов строительства, $k = \overline{1,K}$;

E^{jk} – j -й этап объекта k -го класса;

$\mathbf{Y}_2 = \{T^{jk}\}$ – совокупность интервалов выполнения этапов по классам объектов;

T^{jk} – время выполнения j -го этапа объекта k -го класса;

D_{op}^{ood} – доход предприятия, планируемый на год;

RhP^{200} – расход предприятия, планируемый на год.

Годовая программа разбивается на квартальные и сопровождается актами о приемке выполненных работ и соответствующими справками о стоимости выполненных работ и затрат. При этом необходимо учитывать выполнение этапов работ каждого квартала: начаты, завершены, переходят на следующий квартал.

Физическая постановка задачи планирования на квартал состоит в определении заданий для участков СМО, доходов и расходов предприятия с тем, чтобы квартальная валовая прибыль СМО была максимальной и была не ниже заданий годовой программы.

Квартальные программы подчиняются годовому плану и представляют собой: совокупность этапов выполнения работ; сроки выполнения этапов; доходную и расходную части предприятия за выполнение плановых заданий в течение квартала.

Формальная постановка задачи планирования на квартал представлена в виде

$$I_{2n} = F_2(Y_1^*, Y_2^*, D_{op}^{кв,n}, RhP^{кв,n}) \rightarrow \max_{E_m^j, T_m^j} \quad (4)$$

где n – номер квартала, $n = \overline{1,4}$;

I_{2n} – валовая прибыль предприятия за квартал n ;

$Y_1^* = \{E_m^j\}$ – совокупность этапов по объектам строительства;

E_m^j – j -й этап m -го объекта строительства;

$Y_2^* = \{T_m^j\}$ – совокупность интервалов выполнения этапов по объектам строительства;

T_m^j – время выполнения j -го этапа m -го объекта;

$D_{op}^{кв,n}$ – доход предприятия, планируемый на квартал n ;

$RhP^{кв,n}$ – расходы предприятия, планируемые на квартал n [5].

При этом имеют место следующие ограничения:

$$\sum_{n=1}^4 I_{2n} \geq I_1, \quad (5)$$

$$T_m^j \subseteq T_n^{кв}, \quad (6)$$

где $T_n^{кв}$ – длительность квартала n .

На основании решения задачи квартального планирования, составляется план предприятия на месяц. При этом учитывается, какие именно

строительно-монтажные работы будут выполнены полностью в данном месяце, какие перейдут на следующий месяц, а какие будут только начаты.

Физическая постановка задачи планирования на месяц состоит в следующем:

Определить на каждом участке такие виды работ и интервалы их выполнения, с учетом ограничений на производственные мощности предприятия, при выполнении которых прибыль по участкам за месяц будет максимальной.

В общем виде **формальная постановка задачи планирования на месяц** представлена функционалом вида

$$I_{3p} = F_3(\mathbf{Y}_1^{**}, \mathbf{Y}_2^{**}, \mathbf{Y}_3, D_{op}^{мес,p}, RhP^{мес,p}) \rightarrow \max_{R_i(j,l)T(i,j,l)}, \quad (7)$$

где p – номер месяца, $p = \overline{1,12}$;

I_{3p} – валовая прибыль предприятия за месяц p ;

$\mathbf{Y}_1^{**} = \{R_i(j,l)\}$ – совокупность СМР соответствующих этапов, выполняемых на участках предприятия;

i – номер вида работ, $i = \overline{1,17}$;

j – номер этапа строительства, $j = \overline{1,6}$;

l – номер участка, $l = \overline{1,L}$;

$R_i(j,l)$ – i -й вид СМР j -го этапа, выполняемый на l -м участке;

$\mathbf{Y}_2^{**} = \{T(i,j,l)\}$ – совокупность интервалов выполнения указанных СМР;

$T(i,j,l)$ – интервал выполнения i -го вида СМР j -го этапа участком l ;

$\mathbf{Y}_3 = \{ZagrT_g(i,j,l)\}$ – совокупность групп техники, используемых при выполнении указанных СМР;

g – номер вида строительной техники, $g = \overline{1,13}$;

$ZagrT_g(i,j,l)$ – g -я группа строительной техники, используемой при выполнении i -го вида СМР j -го этапа на l -м участке;

$D_{op}^{мес,p}$ – доходная часть предприятия, планируемая на месяц p ;

$RhP^{мес,p}$ – расходная часть предприятия, планируемая на месяц p [5].

Также имеет место ограничение – совокупная прибыль предприятия по месяцам квартала не может быть меньше решения задачи (4), т.е.

$$\sum_p I_{3p} \geq I_{2n}. \quad (8)$$

Рассматриваемые задачи можно отнести к нелинейным задачам с ограничениями. Для решения поставленных задач выбран метод наискорейшего спуска с разными исходными условиями. Ограничения будут переходить из годовой программы на квартальную, с квартальной – на месячный план.

Выводы и перспективы дальнейшего развития. Научная новизна заключается в постановке задач планирования на трех временных интервалах. Практическая значимость состоит в том, что получен инструментарий принятия решений при планировании строительно-монтажных работ.

Список литературы: 1. Хан Д. ПИК: Планирование и контроль: концепция контроллинга / Д. Хан. – М. : Финансы и статистика, 1997. – 400 с. 2. Оптимизация управления процессом деятельности строительного предприятия / Торкатюк В. И., Дмитрук И. А., Стадник Г. В. [и др.]; Под общ. ред. д. т. н. проф. В. И. Торкатюка. – Х. : ХНАГХ, 2004. – 552 с. 3. Рыков А. С. Модели методы системного анализа: принятие решений и оптимизация / А. С. Рыков. – М. : МИССИС, 2005. – 352 с. 4. Криводубский О. А. Логико-формальные модели планирования строительно-монтажных работ на верхнем уровне системы управления / О. А. Криводубский, О. А. Шевчук // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – Вип. 4 (16). – С. 124–127. 5. Криводубский О. А. Логико-формальные модели планирования финансовой деятельности строительно-монтажной организации / О. А. Криводубский, О. А. Шевчук // Системи обробки інформації. – Х. : ХУПС, 2011. – Вип. 4 (94). – С. 240–244. 6. Шевчук О. А. Структура системы принятия решений строительно-монтажных организаций / О. А. Шевчук // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. – 2009. – № 1. – С. 328–334.

Надійшла до редколегії 18.11.2013

УДК 519. 816.8:69

Система принятия решений при планировании деятельности строительно-монтажной организации / О. А. Шевчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 62 (1035). – С. 130–135. – Бібліогр.: 8 назв.

Стаття присвячена формалізації процесу планування діяльності будівельно-монтажних організацій (БМО), яка дозволить розробити систему прийняття рішень при плануванні діяльності будівельного підприємства. Проведено аналіз будівельно-монтажної організації як об'єкта управління, описані рівні управління БМО, сформовані функціонали цілі.

Ключові слова: формалізація процесу планування, будівельно-монтажна організація.

The article is devoted to formalization of planning process of Building and construction organizations (BCO), which will allow develop a system of decision-making in the planning of a construction company. This paper contains the analysis of the construction and mounting company as a management object, the description of the levels of management BCO, the formulation of the functional aim.

Keywords: formalization of process of planning, building and construction organization.

А. Ю. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
А. И. ПОТАПЕНКО, студентка НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ ВОКСЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛАКА

Продемонстрировано строение 3D-модели электронного облака атома водорода в разрезе и в полноценном виде с помощью воксельной модели. Построены волновые функции.

Ключевые слова: волновая функция, воксельная модель, электронное облако, атом водорода, 3D-моделирование.

Введение. Наглядная модель, отражающая функцию распределения плотности вероятностей обнаружения электрона в атоме или молекуле, является электронным облаком. В первое время после появления знаменитого волнового уравнения Э. Шредингера предпринималось много попыток выяснить возможный физический смысл волновой функции [1, 2]. М. Борн показал [3], что эти волны следует толковать статистически с точки зрения теории вероятности, а сами волны описывают вероятность обнаружения электрона в той или иной точке конфигурационного пространства.

В настоящее время волновые свойства электронов широко используются при исследовании построения различных веществ. Чем с большей точностью определяют положение электрона в пространстве, тем с меньшей точностью можно определить его скорость. И наоборот, чем с большей точностью определяют скорость электрона (абсолютную величину и направление), тем с меньшей точностью можно определить его положение в пространстве. Это утверждение называется «принцип неопределенности» [3]. Действительно, если в какой-то момент точно известно положение электрона, то ничего не известно о его скорости и в следующий момент времени можно обнаружить электрон в какой-то другой точке атома, правда, с разной вероятностью. Вероятность обнаружения электрона в какой-либо точке электронной оболочки атома показывает: насколько часто «он там бывает».

В качестве наглядной модели состояния электрона в атоме в химии принят образ облака, плотность соответствующих участков которого пропорциональна вероятности обнаружения электрона [4]. Электронное облако рисуется наиболее плотным в областях наиболее вероятного обнаружения электрона (рис. 1). Из-за постоянного перемещения электрона вокруг атома создается туманность, напоминающее облако, поэтому определить положение электрона крайне затруднительно.

Для исследования особенностей поведения электрона можно воспользоваться моделью поведения электрона в атоме, в которой используется представление об электронном облаке. Но часто на практике

© А. Ю. Сидоренко, А. И. Потапенко, 2013

встречаются атомы, в которых электронные облака расположены многослойно. Это затрудняет моделирование в 3D-пространстве. Поэтому представляет интерес разработать алгоритм, который будет позволять проникать в глубину электронного облака. Это обеспечит более подробное изучение строения электронного облака атома. Итак, исследование поведения электрона в настоящее время является актуальной задачей.

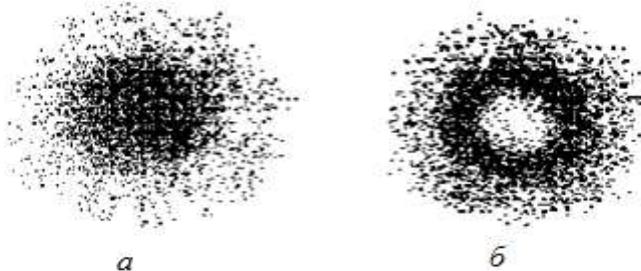


Рис. 1 – Электронное облако как набор моментальных «фотографии» электрона:
а – вид со стороны, *б* – вид в сечении

Существуют модели, которые пытаются передать состояние электронного облака, но эти модели встречаются в литературе и несут показательный характер. Для моделирования электронного облака атома водорода в разрезе и в полноценном виде в работе использовалась воксельная модель. С помощью этой модели упрощается изучение самого электронного облака, т.к. его можно представить в разрезе и покрутится вокруг него.

Целью данной статьи является построение 3D-модели электронного облака атома водорода в разрезе и в полноценном виде с помощью воксельной модели.

Основные теоретические сведения. В данной статье рассматривается атом водорода, т.к. именно для него существуют формулы описания его состояния, с помощью которых можно найти вероятность расположения электрона. Вследствие этого, уравнение Шредингера упрощается и используется, так называемая, волновая функция (1).

$$\Psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = R_{n,l} \Theta_{l,m} \Phi_{m_l} = [e^{-nr} r^l L_{n,l}(r)] [P_{l,m_l}(\cos \theta)] A e^{im_l \varphi}, \quad (1)$$

где $L_{n,l}(r)$ – присоединенные полиномы Лагерра, P_{l,m_l} – полиномы Лежандра.

Решая уравнение (1), можно найти состояние электрона не только в атоме, но и в молекуле. Эти состояния называются орбиталями. В соответствии с уравнением (1) каждая атомная орбиталь однозначно характеризуется набором из трех целых чисел, называемых квантовыми числами. Эти числа получили особые названия и обозначения:

- главное квантовое число – n ,

- орбитальное квантовое число – l
- магнитное квантовое число – m .

Для исследования электронного облака атома водорода рассмотрим основные особенности поведения электронов в атоме. Энергия свободного электрона, так же как и энергия тела, может изменяться непрерывно. Но энергия связанного электрона, в частности электрона в атоме, может принимать только вполне определенные значения. Таким образом, электрон в атоме может находиться только во вполне определенных состояниях. Так как не все состояния электрона в атоме возможны, то и сочетание этих чисел могут быть, отнюдь, не любые, а только те, которые удовлетворяют следующим трем правилам:

- Главное квантовое число n может быть любым положительным целочисленным числом: $n = 1, 2, 3, \dots$
- Орбитальное квантовое число l может принимать любые целые значения от нуля до $n-1$: $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$.
- Магнитное квантовое число m может принимать любые целые значения от $-l$ до $+l$, включая ноль: $m = -l, \dots, -1, 0, 1, \dots, +l$.

При переходе электрона из одного состояния в другое энергия поглощается или выделяется порциями – квантами энергии. Поэтому первая особенность поведения электрона часто называется принципом квантования его энергии [1]. Электрон в одних случаях проявляет свойства частицы вещества, а в других – волновые свойства. Волновые свойства электрона проявляются, например, при прохождении потока электронов через тонкую кристаллическую пленку.

Моделирование электронного облака атома водорода. Для отображения электронного облака в данной статье применялась воксельная модель. Модель представлена как трехмерный массив, в котором каждая ячейка описывает один воксель [5, 6].

Идея воксельной графики базируется на понятии трёхмерного пикселя – кубического единичного объема, из которого составлено всё отображаемое пространство, при этом воксели могут быть прозрачными, залитыми одним цветом или градиентом цвета по цветам вершин куба.

Рассматривать воксельную графику без специально разработанных алгоритмов оптимизации использования памяти, нет смысла, потому как объем воксельного пространства представленный всеми вокселями столь огромный, что для небольшой сцены требуются гигабайты памяти. Например, при дискретности пространства 1см и размера сцены $100 \times 100 \times 100$, количество вертексов составляет $10000 \times 10000 \times 10000 = 10^{12}$ шт., если для одного вокселя требуется хранить только один цвет, то есть 24бита, то получается, что такая сцена займёт $3 \cdot 10^{12}$ байт (373Гбайт).

Для возможности использования модели воксельной графики было разработано множество алгоритмов, которые нашли большое применение для работы с двухмерной графикой [6]. Основа этих алгоритмов – использование древовидных структур, позволяющих описывать состояние не для одного конкретно вокселя, а для некоторой их совокупности. В данном случае в основе лежит регулярная трёхмерная сетка. Первый узел дерева – корень, является кубом, содержащим весь объект целиком. Каждый узел имеет 8 потомков или не имеет никаких потомков. Эти 8 потомков формируют куб $2 \times 2 \times 2$ (см. рис. 2). При таком подходе, область пространства, имеющая одинаковые характеристики всех вокселей, из которых она состоит, может быть описана одним большим вокселем, уменьшая, таким образом, объём необходимой памяти для хранения воксельного пространства.

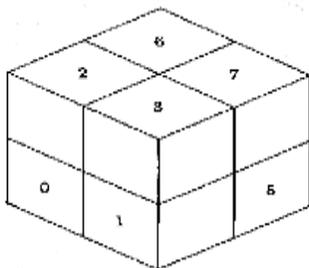


Рис. 2 – Рекурсивное разбиение пространства на восемь потомков

В данной статье для 3D-моделирования электронного облака атома водорода использовался следующий алгоритм:

- Вычисление значения волновой функции при заданных параметрах: n, l, m .
- Расчет вероятности нахождения электрона в электронном облаке.
- Моделирование, с учетом вводимых параметров, электронного облака атома водорода с помощью воксельной модели.
- Закрашивание всего пространства электронного облака с учетом вероятности нахождения электрона: чем ближе вероятность к нулю, тем темнее цвет.

Основные результаты. На рис. 3 изображена воксельная модель электронного облака атома водорода с параметрами: $n=5, m=4, l=0$ в полном размере.

Из рис. 3 можно увидеть, как модель разбита на небольшие кубики – воксели. На этой модели белым цветом обозначается наибольшая вероятность нахождения электрона в атоме, а темным – наименьшая. Вероятность нахождения электрона мала, так как белый цвет тусклый, а не яркий. Из рис. 3 видно, что вероятность нахождения электрона находится на краях электронного облака.

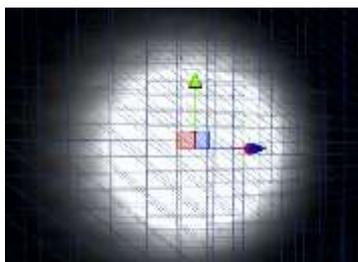


Рис. 3 – Воксельная модель электронного облака с параметрами: $n = 5$, $m = 4$, $l = 0$

На рис. 4 изображена волновая функция нахождения электрона в атоме водорода с параметрами $n = 1$, $m = 0$, $l = 0$.

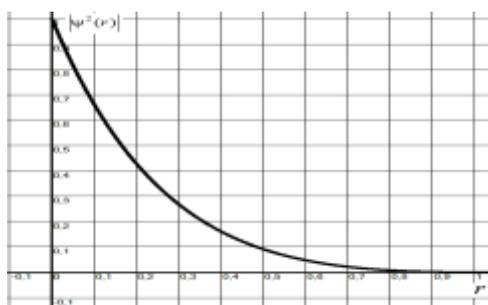


Рис. 4 – Волновая функция нахождения электрона в атоме с параметрами: $n = 1$, $m = 0$, $l = 0$

Из рис. 4 можно сделать вывод, что чем ближе к центру облака, тем вероятность нахождения электрона больше.

Моделирование электронного облака атома водорода в сечении и в полноценном размере с теми же параметрами изображено на рис. 5.

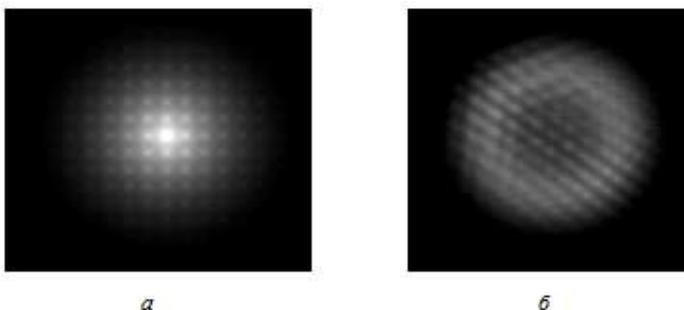


Рис. 5 – Модель электронного облака с параметрами: $n = 1$, $m = 0$, $l = 0$
 a – в сечении, $б$ – в полноценном размере

Анализируя рис. 5 можно провести аналогию с рис. 4. Максимум волновой функции находится при $r=0$, значит, в соответствии с алгоритмом, расстояние между центром облака и начальным радиусом закрашивается белым. Чем меньше вероятность нахождения электрона, тем темнее закрашивается клетка.

На рис. 6 изображена волновая функция нахождения электрона в атоме водорода с параметрами $n = 5$, $m = 0$, $l = 1$.

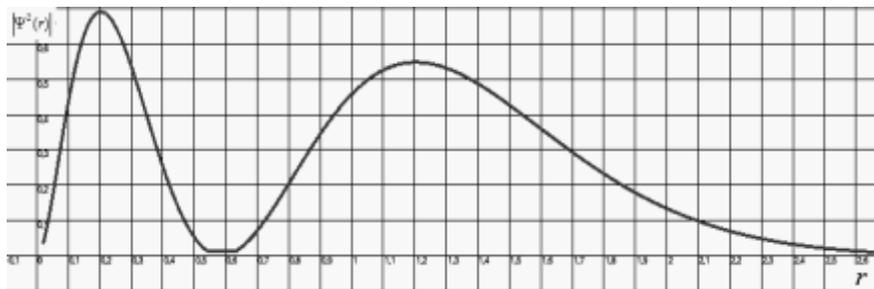


Рис. 6 – Волновая функция нахождения электрона в атоме с параметрами: $n = 5$, $m = 0$, $l = 1$

На рис. 6 можно увидеть два максимума волновой функции для нахождения электрона в атоме водорода. Поскольку орбитальное квантовое число не равно нулю, то на графике наблюдается несколько максимумов.

На рис. 7 изображена 3D модель атома водорода с параметрами: $n = 5$, $m = 0$, $l = 1$. Анализируя рис. 7, можно провести аналогию с рис. 6. Поскольку на рис. 6 наблюдается два максимума волновой функции, следовательно, согласно используемому алгоритму, электронное облако водорода будет иметь две области, закрашенные белым цветом. Чем меньше вероятность нахождения электрона, тем темнее цветом закрашивается ячейка.

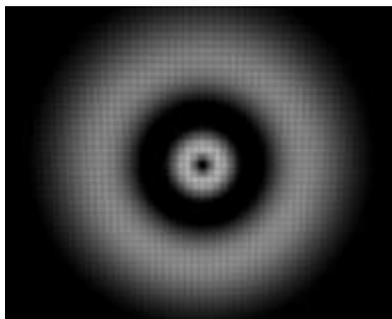


Рис. 7 – Модель электронного облака с параметрами: $n = 5$, $m = 0$, $l = 1$

Главное квантовое число характеризует энергию электронов, занимающих данный энергетический уровень. Оно является первым в ряду квантовых чисел, который включает в себя главное, орбитальное и магнитное квантовые числа, а также спин. В данной работе используется только главное квантовое число n , которое равно номеру периода элемента. При увеличении главного квантового числа возрастает энергия электрона. Также волновая функция становится более пологой, когда уменьшается главное квантовое число, значит, площадь электронного облака уменьшается.

Выводы. В данной работе была рассмотрена реализация отображения в 3D-пространстве модели электронного облака атома водорода с одним слоем с помощью воксельной модели. Данные 3D-модели позволяют определить точное положение электрона.

Данная статья позволяет наглядно посмотреть поведение электрона без всяких раздражителей в 3D-пространстве. Модель электронного облака представляется в разрезе, что позволяет подробно увидеть поведение электрона в самом облаке, и в полноценном виде, благодаря этому видно само электронное облако атома водорода.

Список литературы: 1. *Акоста В.* Основы современной физики / *В. Акоста, К. Кован, Б. Грэм.* Пер. с англ. *В. В. Толмачева, В. Ф. Трифонова* / ред. *А. Н. Матвеева.* – М. : Просвещение, 1981. – 495 с. 2. *Сивухин Д. В.* Спектр водорода / *Д. В. Сивухин* // Общий курс физики. Т V. Атомная и ядерная физика. Часть 1: Атомная физика. – М. : Наука, 1986. – 416 с. 3. Физическая энциклопедия / ред. *А. М. Прохорова.* – М. : Большая российская энциклопедия, 1994. 4. *С. Т. Жуков.* Химия. 8–9 класс / *С. Т. Жуков.* – М. : , 2002. 5. *Чеканов Д.* Рендеринг с помощью вокселей: новый уровень графики в играх [Электронный ресурс] // THG. URL: http://www.thg.ru/graphic/voxel_ray_casting/ (Дата обращения: 30.10.2009) 6. *Ягель Р.* Рендеринг объемов в реальном времени // Открытые системы. 1996. № 5. URL: <http://www.osp.ru/os/1996/05/178971>. (Дата обращения: 18.02.2012).

Надійшла до редколегії 18.11.2013

УДК 51-72

Применение воксельной модели при моделировании электронного облака / А. Ю. Сидоренко, А. И. Потапенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 136–142. – Бібліогр.: 6 назв.

Продемонстрована будова 3D-моделі електронної хмари атома водню в розрізі і в повноцінному вигляді за допомогою воксельної моделі. Побудовані хвилеві функції.

Ключові слова: хвилева функція, воксельна модель, електронна хмара, атом водню, 3D-моделювання.

The structure of 3D model of electronic cloud of atom of hydrogen is shown in a cut and in a valuable kind by means of voxel model. Wave functions are built.

Keywords: wave function, voxel model, electronic cloud, atom of hydrogen, 3D model.

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ЦИФРОВОЙ СТАБИЛИЗАТОР ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ТАНКОВОГО ПРИЦЕЛА-ДАЛЬНОМЕРА

Показано, что в развитии систем управления огнем современных танков прослеживается тенденция перехода от стабилизаторов лазерного луча прицела-дальномера силового типа к стабилизаторам индикаторного типа. Исследованы процессы стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера при использовании цифрового стабилизатора индикаторного типа с цифровыми низкочастотными фильтрами. Показано, что наилучшая помехозащищенность замкнутой системы стабилизации может быть достигнута использованием цифровых фильтров Баттеруорта и Ланцоша, функционирующих по последовательно-параллельной схеме.

Ключевые слова: танковый прицел-дальномер, цифровой стабилизатор, низкочастотные цифровые фильтры.

Введение. Системы управления огнем современных танков содержит лазерные прицелы-дальномеры, в которых направление лазерного луча определяет линию прицеливания, а лазерный луч стабилизируется относительно направления на цель. При силовой стабилизации лазерного луча ось головного подвижного зеркала прицела связана ленточной передачей с осью внешней рамки гиросtabilизированной платформы. Так как оси рамок гиросtabilизированной платформы сохраняют неизменное направление в пространстве, неизменное направление сохраняет и головное зеркало прицела, определяющее направление линии прицеливания [1, 2].

Проблема повышения точности стабилизации линии прицеливания актуальна потому, что в современных танковых комплексах управляемого вооружения наведение ракет осуществляется по лазерному лучу прицела-дальномера и точность такого комплекса напрямую зависит от точности стабилизации лазерного луча.

Целью настоящей работы является построение такого алгоритма стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера, который обеспечивал бы необходимый уровень помехозащищенности, а следовательно, и точности системы стабилизации.

Основная часть. Для снижения уровня вибраций головного зеркала танкового прицела-дальномера в последние годы вместо систем силовой стабилизации переходят к системам индикаторной стабилизации, представляющих собой следящие системы передачи угла. Схема такой системы приведена на рис. 1, где приняты обозначения ПН – пульт наведения; ЭН – электромагнит наведения; ГСП – гиросtabilизированная платформа; ВТ1, ВТ2 – вращающиеся трансформаторы; Р1, Р2 – роторы вращающихся трансформаторов; С1, С2 – статоры вращающихся трансформаторов; П1, П2 – потенциометры; ЦЭБ – цифровой электронный

© Т. Е. Александрова, 2013

блок; ИЭД – исполнительный электродвигатель; ШР – шестеренчатый редуктор; ПЗ, НЗ – соответственно подвижное и неподвижное зеркала прицела.

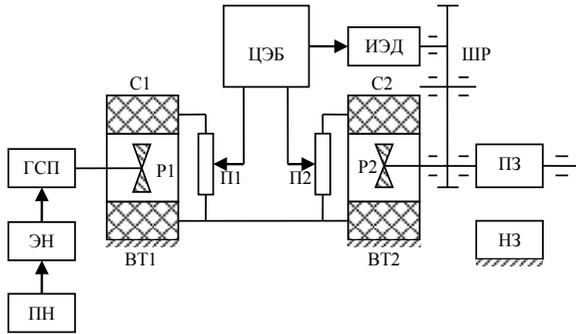


Рис. 1 – Индикаторный стабилизатор лазерного луча танкового прицела-дальномера

С выходов потенциометров П1 и П2 на входы цифрового электронного блока поступают сигналы переменного тока частотой 500 Гц, амплитуда которых пропорциональна углам поворота роторов P1 и P2 вращающихся трансформаторов относительно их статоров C1 и C2. В цифровом электронном блоке эти сигналы преобразуются в сигналы постоянного тока $u_1(t)$ и $u_2(t)$, а затем формируется их алгебраическая сумма

$$u_{\varphi}(t) = u_1(t) + u_2(t), \quad (1)$$

которая подается на вход преобразователя «аналог-код», где преобразуется в решетчатую функцию $u_{\varphi}[nT]$, где T – период дискретности ЦЭБ. На основании дискретного сигнала $u_{\varphi}[nT]$ цифровой электронный блок формирует алгоритм стабилизации $\sigma[nT]$, подаваемый на вход преобразователя «код-аналог», с выхода которого сигнал управления $\sigma(t)$ подается на вход исполнительного электродвигателя, якорь которого через шестеренчатый редуктор связан с осью подвижного зеркала прицела. При повороте корпуса танка на угол $\varphi_k(t)$ появляется угловое рассогласование между ротором P1, связанным с неподвижной в пространстве рамкой гиостабилизированной платформы, и статором C1, подвижно закрепленном на корпусе танка. Сигнал с выхода потенциометра П1 подается на вход цифрового электронного блока ЦЭБ, а с выхода ЦЭБ сигнал $\sigma(t)$ подается на вход исполнительного электродвигателя ИЭД, якорь которого через редуктор ШР передает вращение оси подвижного зеркала ПЗ, которое поворачивается на угол $\varphi_3(t) = -\varphi_k(t)$ в сторону противоположную повороту корпуса танка.

При этом изображение цели в неподвижном зеркале НЗ остается неподвижным.

В работе [3] авторами показано, что для повышения точности стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера в алгоритме стабилизации необходимо использовать не только информацию о сигнале (1), но также информацию о производной этого сигнала по времени. Для аналоговой системы стабилизации такой алгоритм записывается в виде

$$\sigma(t) = k_{\varphi} u_{\varphi}(t) + k_{\dot{\varphi}} \dot{u}_{\varphi}(t), \quad (2)$$

где k_{φ} и $k_{\dot{\varphi}}$ - коэффициенты усиления аналогового стабилизатора.

Дифференцирование по времени зашумленного высокочастотной помехой сигнала $u_{\varphi}(t)$ приводит к возрастанию ошибки при определении функции $\sigma(t)$, иными словами, к снижению помехозащищенности системы стабилизации, что, в конечном итоге, приводит к снижению точности стабилизации лазерного луча.

В работе [4] предпринята попытка использовать аналогичный по структуре алгоритм стабилизации для цифрового электронного блока

$$\sigma[nT] = k_{\varphi} u_{\varphi}[nT] + \frac{k_{\dot{\varphi}}}{T} \{u_{\varphi}[nT] - u_{\varphi}[(n-1)T]\}, \quad (3)$$

Здесь же на качественном уровне показано, что алгоритм (3) не в состоянии обеспечить высокую помехозащищенность, а, следовательно, и точность цифровой системы стабилизации. Действительно, квантование по времени зашумленного высокочастотными помехами сигнала $u(t)$ приводит к снижению помехозащищенности системы, как и дифференцирование зашумленного сигнала $u(t)$.

В соответствии с работой [4], дискретная передаточная функция приведенной непрерывной части системы записывается

$$W_{\text{ПЧ}}(z) = \frac{z-1}{z} Z\{h_{\text{ПЧ}}[nT]\} = k_{\text{ПЧ}} \left\{ \frac{\left[T_D \left(e^{\frac{T}{T_D}} - 1 \right) + T \right] z - \left[T_D \left(e^{\frac{T}{T_D}} - 1 \right) + T e^{\frac{T}{T_D}} \right]}{\left(z - e^{-\frac{T}{T_D}} \right) (z-1)} \right\}. \quad (4)$$

Передаточную функцию ЦЭБ, с учетом соотношения (3), запишем в виде

$$W_{\text{ЭБ}}(z) = k + \frac{k_{\dot{\varphi}}}{T} \cdot \frac{z-1}{z}. \quad (5)$$

Тогда характеристическое уравнение замкнутой цифровой системы стабилизации лазерного луча определяется соотношением

$$1 + W_{ЭБ}(z)W_{ПНЧ}(z) = 0. \quad (6)$$

Подставляя в (6) соотношения (4) и (5), получаем

$$z^3 - \left[a_3 - k_{ПНЧ} \left(k + \frac{k}{T} \right) a_1 \right] z^2 + \left[a_4 - k_{ПНЧ} \frac{k}{T} a_1 - k_{ПНЧ} \left(k + \frac{k}{T} \right) a_2 \right] z + k_{ПНЧ} \frac{k}{T} a_2 = 0, \quad (7)$$

где введены следующие обозначения:

$$a_1 = T_{Дл} \left(e^{\frac{T}{T_{Дл}}} - 1 \right) + T; \quad a_2 = T_{Дл} \left(e^{\frac{T}{T_{Дл}}} - 1 \right) + T e^{\frac{T}{T_{Дл}}}; \quad a_3 = e^{\frac{T}{T_{Дл}}} + 1; \quad a_4 = e^{\frac{T}{T_{Дл}}}.$$

Величина коэффициента усиления непрерывной части системы $k_{ПНЧ}$ отрицательна, в связи с тем, что поворот подрессоренной части корпуса танка, на которой установлен прицел танковой пушки, на некоторый угол $\varphi_k(t)$ вызывает поворот головного зеркала прицела в противоположную сторону на угол $\varphi_3(t) = -\varphi_k(t)$, с целью сохранения неизменного направления в пространстве линии прицеливания.

Связь между комплексными переменными s и z соответственно преобразования Лапласа и Z -преобразования определяются формулой [6]

$$z = e^{sT}. \quad (8)$$

В формуле (8) произведем замену $s = j\omega$. В результате получаем:

$$\begin{aligned} z &= e^{j\omega T} = \cos \omega T + j \sin \omega T; \\ z^2 &= e^{2j\omega T} = \cos 2\omega T + j \sin 2\omega T; \\ z^3 &= e^{3j\omega T} = \cos 3\omega T + j \sin 3\omega T. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставим соотношения (9) в характеристическое уравнение (7), выделим действительную и мнимую части и приравняем их нулю. В результате получаем два линейных алгебраических уравнения относительно варьируемых констант k_φ и k_ψ :

$$\begin{aligned} k_\varphi A(\omega T) + k_\psi B(\omega T) &= C(\omega T); \\ k_\varphi D(\omega T) + k_\psi E(\omega T) &= F(\omega T), \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned}
A(\omega T) &= -k_{\text{нч}} \cos 2\omega T + k_{\text{нч}} \cos \omega T; \\
B(\omega T) &= -k_{\text{нч}} \frac{a_1}{T} \cos 2\omega T + k_{\text{нч}} \frac{a_1 + a_2}{T} \cos \omega T - k_{\text{нч}} \frac{a_2}{T}; \\
C(\omega T) &= -\cos 3\omega T + a_3 \cos 2\omega T - a_4 \cos \omega T; \\
D(\omega T) &= -k_{\text{нч}} \sin 2\omega T + k_{\text{нч}} \sin \omega T; \\
E(\omega T) &= -k_{\text{нч}} \frac{a_1}{T} \sin 2\omega T + k_{\text{нч}} \frac{a_1 + a_2}{T} \sin \omega T; \\
F(\omega T) &= -\sin 3\omega T + a_3 \sin 2\omega T - a_4 \sin \omega T.
\end{aligned}$$

Решения системы (10) определяется соотношениями:

$$\begin{aligned}
k_{\phi} &= \frac{C(\omega T)E(\omega T) - F(\omega T)B(\omega T)}{A(\omega T)E(\omega T) - D(\omega T)B(\omega T)}; \\
k_{\phi} &= \frac{A(\omega T)F(\omega T) - D(\omega T)C(\omega T)}{A(\omega T)E(\omega T) - D(\omega T)B(\omega T)}.
\end{aligned} \tag{11}$$

С помощью соотношений (11) в плоскости варьируемых параметров k_{ϕ} , k_{ϕ} построим область устойчивости замкнутой системы стабилизации, представленную на рис. 2. Значения параметров стабилизатора при этом принимаются равными $k_{\text{нч}} = -1$; $T_{\text{д}} = 0,2\text{с}$; $T = 0,01\text{с}$.

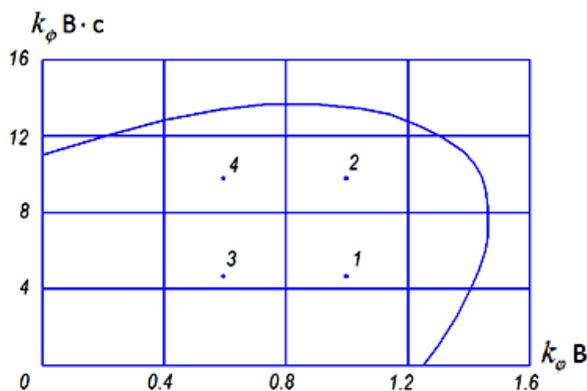


Рис. 2 – Область устойчивости замкнутой системы стабилизации

Рассмотрим дискретную передаточную функцию замкнутой системы стабилизации линии прицеливания

$$W(z) = \frac{W_{\text{ПНЧ}}(z)}{1 + W_{\text{ЭБ}}(z)W_{\text{ПНЧ}}(z)}. \quad (12)$$

С учетом соотношений (9) формула (12) принимает вид

$$\begin{aligned} W(j\omega T) &= \frac{k_{\text{ПЧ}} [P(\omega T) + jQ(\omega T)]}{R(\omega T) + jS(\omega T)} = \\ &= k_{\text{ПЧ}} \left\{ \frac{P(\omega T)R(\omega T) + Q(\omega T)S(\omega T)}{R^2(\omega T) + S^2(\omega T)} + j \frac{R(\omega T)Q(\omega T) - P(\omega T)S(\omega T)}{R^2(\omega T) + S^2(\omega T)} \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} P(\omega T) &= a_1 \cos 2\omega T - a_2 \cos \omega T; \\ Q(\omega T) &= a_1 \sin 2\omega T - a_2 \sin \omega T; \\ R(\omega T) &= -C(\omega T) + k_{\phi} A(\omega T) + k_{\phi} B(\omega T); \\ S(\omega T) &= -F(\omega T) + k_{\phi} D(\omega T) + k_{\phi} E(\omega T). \end{aligned}$$

Используя формулу (13), запишем соотношения для расчета АЧХ и ФЧХ цифрового стабилизатора

$$M(\omega T) = |k_{\text{ПЧ}}| \sqrt{\frac{P^2(\omega T) + Q^2(\omega T)}{R^2(\omega T) + S^2(\omega T)}}; \quad (14)$$

$$\Psi(\omega T) = \arctg \frac{P(\omega T)Q(\omega T) + P(\omega T)S(\omega T)}{|P(\omega T)R(\omega T) + Q(\omega T)S(\omega T)|}. \quad (15)$$

На рисунке 3 приведены АЧХ (сплошные линии) и ФЧХ (пунктирные линии) замкнутой цифровой системы стабилизации, соответствующие точкам 1, 2, 3 и 4 области устойчивости, приведенной на рис. 2. Анализ этих характеристик позволяет сделать вывод, что использование алгоритма стабилизации (3) с передаточной функцией (5) приводит к значительным искажениям передаваемого сигнала цифровой следящей системы передачи угла, а именно, к подавлению амплитуд в области рабочих частот и к значительному фазовому запаздыванию передаваемого сигнала в области рабочих частот. Иными словами, использование алгоритма (3) не приводит к подавлению высокочастотных шумов в спектре передаваемого сигнала, а приводит только к недопустимым искажениям сигнала в области рабочих частот. Для уменьшения этих искажений требуется значительное усложнение алгоритма стабилизации (3) путем использования цифровых низкочастотных фильтров [7, 8].

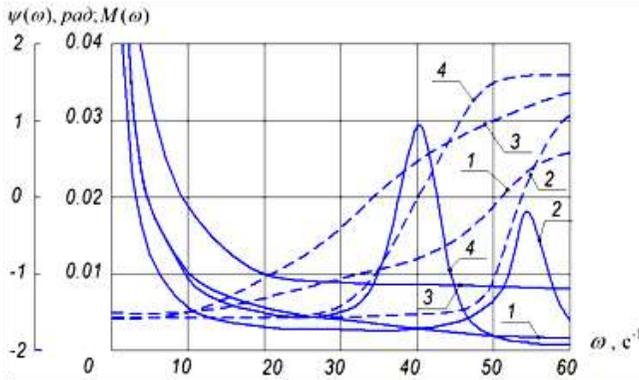


Рис. 3 – АЧХ и ФЧХ замкнутой цифровой системы стабилизации

В работе [9] показано, что наиболее эффективным способом подавления высокочастотных помех и уменьшения искажений передаваемого следящей системой сигнала является использование в алгоритме стабилизации цифровых фильтров Баттеруорта и Ланцоша, функционирующих по последовательно-параллельной схеме.

Передаточная функция стабилизатора в этом случае записывается в виде

$$W_{ЭБ}(z) = k_{\phi} W_{Б}(z) [1 + k_{\phi} W_{Л}(z)] \quad (16)$$

где $W_{Б}$, $W_{Л}$ - передаточные функции фильтров Баттеруорта и Ланцоша.

Предположим, что в ЦЭБ используются фильтры Баттеруорта и Ланцоша второго порядка с передаточными функциями

$$W_{Б}(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}; \quad (17)$$

$$W_{Л}(z) = c_0 + c_1 z^{-1} - c_1 z^{-3} - c_0 z^{-4}. \quad (18)$$

Подставляя соотношения (17) и (18) в формулу (16), получаем

$$W_{ЭБ}(z) = \frac{k \{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + k \cdot (f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} - f_2 z^{-4} - f_1 z^{-5} - f_0 z^{-6})\}}{1 + l_1 z^{-1} + l_2 z^{-2}}, \quad (19)$$

$$\text{где } d_0 = \frac{a_0}{b_0}; \quad d_1 = \frac{a_1}{b_0}; \quad f_0 = \frac{a_0 c_0}{b_0}; \quad f_1 = \frac{a_0 c_1 + a_1 c_0}{b_0}; \quad f_2 = \frac{a_0 c_0 + a_1 c_1}{b_0}; \quad l_1 = \frac{b_1}{b_0};$$

$$l_2 = \frac{b_2}{b_0}.$$

Передаточной функции (19) соответствует следующий алгоритм управления

$$\begin{aligned} \sigma[nT] = & k_{\varphi} \{d_0 u_{\varphi}[nT] + d_1 u_{\varphi}[(n-1)T] + d_0 u_{\varphi}[(n-2)T]\} + \\ & + k_{\varphi} \left\{ \begin{aligned} & f_0 u_{\varphi}[nT] + f_1 u_{\varphi}[(n-1)T] + f_2 u_{\varphi}[(n-2)T] - \\ & - f_2 u_{\varphi}[(n-4)T] - f_1 u_{\varphi}[(n-5)T] - f_0 u_{\varphi}[(n-6)T] \end{aligned} \right\} - \quad (20) \\ & - l_1 \sigma[(n-1)T] - l_2 \sigma[(n-2)T]. \end{aligned}$$

Алгоритм стабилизации (20) намного сложнее алгоритма (3). Рассмотрим характеристики цифрового стабилизатора, реализующего алгоритм (20), представленные на рисунке 4 для точек 1, 2 и 5 области устойчивости замкнутой системы стабилизации и для значений параметров фильтров Баттеруорта и Ланцоша, составляющих $a_0 = 0,08073$; $a_1 = 0,16147$; $b_0 = 1,48256$; $b_1 = 1,83854$; $b_2 = 0,67789$; $c_0 = 5$; $c_1 = 2,5$.

Анализ АЧХ и ФЧХ ЦЭБ позволяет сделать вывод о том, что соответствующим выбором значений параметров фильтров Баттеруорта и Ланцоша можно значительно «подправить» АЧХ и ФЧХ замкнутой цифровой системы стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера, а именно, четко определить полосу пропускания полезного сигнала и до минимума свести фазовые искажения передаваемого сигнала.

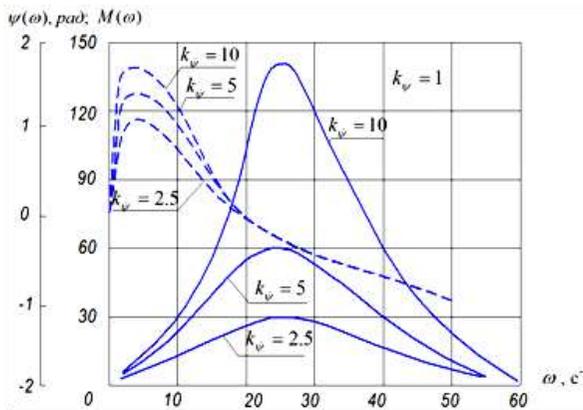


Рис. 4 – Частотные характеристики цифрового стабилизатора, реализующего алгоритм (20)

Выводы. Цифровой стабилизатор индикаторного типа лазерного луча танкового прицела-дальномера обеспечивает высокую точность стабилизации линии прицеливания и имеет высокую помехозащищенность только лишь при условии построения алгоритма стабилизации с использованием

низкочастотного фильтра Баттеруорта и дифференцирующего фильтра Ланцоша, соединенных по последовательно-параллельной схеме.

Список литературы: 1. Александров С. С. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.3. Авто-матичне керування озброєнням танків / С. С. Александров, О. К. Аблесімов, І. С. Александрова – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – 444с. 2. Александров Е. Е. Оценка точности стабилизации поля зрения прицела танковой пушки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – С. 48–51. 3. Александров Е. Е. Оценка точности электромеханического индикаторного стабилизатора поля зрения прибора наблюдения / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Электромеханічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 339–341. 4. Александрова Т. Е. Структурно-параметрический синтез цифрового электромеханического стабилизатора поля зрения прибора наблюдения / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // Электромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3. – С. 375–377. 5. Александров С. С. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.1. Теорія автоматичного керування. / С. С. Александров, Е. П. Козлов, Б. І. Кузнецов – Харків : НТУ «ХПІ», 2002. – 490 с. 6. Джурі Э. Импульсные системы автоматического регулирования. / Э. Джурі – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 455 с. 7. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. / Р. В. Хемминг – М. : Недра, 1984. – 221 с. 8. Ивашко А. В. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов. / А. В. Ивашко – Харьков : НТУ «ХПІ», 2005. – 240 с. 9. Александрова Т. Е. Сравнительный анализ цифровых ПД – стабилизаторов подвижных объектов с низкочастотными фильтрами Баттеруорта и Ланцоша / Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2011. – № 2. – С. 148–152.

Надійшла до редколегії 30.10.2013

УДК 621.11-32

Цифровой стабилизатор лазерного луча танкового прицела-дальномера / Т. Е. Александрова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 143–151. – Бібліогр.: 9 назв.

Показано, що в розвитку систем управління вогнем сучасних танків простежується тенденція переходу від стабілізаторів лазерного променя приціла-далекоміра силового типу до стабілізаторів індикаторного типу. Досліджено процеси стабілізації лазерного променя танкового прицілу-далекоміра при використанні цифрового стабілізатора індикаторного типу з цифровими низькочастотними фільтрами. Показано, що найкраща перешкодозахищеність замкнутої системи стабілізації може бути досягнута використанням цифрових фільтрів Баттеруорта і Ланцоша, що функціонують за послідовно-паралельною схемою.

Ключові слова: танковий приціл-далекомір, цифровий стабілізатор, низькочастотні цифрові фільтри.

The article is shown that in the development of fire control systems of modern tanks trend of transition from stabilizing laser rangefinder sight of the power type to a tracer-type stabilizers. The processes of stabilization of the laser beam tank rangefinder sight when using the digital indicator type stabilizer with digital low-frequency filters. It is shown that the best noise immunity of a closed system stabilization can be achieved by using digital filters Butterworth and Lanczos, operating on a series-parallel circuit.

Keywords: tank rangefinder sight, digital stabilizer, low-frequency digital filters.

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

К ВОПРОСУ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ

Предложена методика синтеза линейных инвариантных систем стабилизации, включающая выбор весовых коэффициентов интегрального квадратичного функционала качества.

Ключевые слова: система стабилизации, инвариантность, интегральный квадратичный функционал.

Введение. Пусть возмущенное движение объекта стабилизации описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением n -го порядка

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{C}\mathbf{F}(t), \quad (1)$$

где $\dot{\mathbf{X}}(t)$ – n -мерный вектор состояния; $\mathbf{U}(t)$ – m -мерный вектор управления; $\mathbf{F}(t)$ – s -мерный вектор возмущения; \mathbf{A} – собственная матрица объекта размерности $n \times n$; \mathbf{B} – матрица управления размерности $n \times m$; \mathbf{C} – матрица возмущения размерности $n \times s$.

В свою очередь, внешнее возмущение $\mathbf{F}(t)$, действующее на объект стабилизации, удовлетворяет векторно-матричному дифференциальному уравнению s -го порядка

$$\dot{\mathbf{F}}(t) = \mathbf{D}\mathbf{F}(t) + \mathbf{E}\xi(t), \quad (2)$$

где $\xi(t)$ – векторный единичный “белый шум”, называемый порождающим, и представляющий собой вектор размерности r ; \mathbf{D} – квадратная матрица размерности $s \times s$; \mathbf{E} – прямоугольная матрица размерности $s \times r$.

Будем предполагать, что стабилизатор реализует линейный алгоритм стабилизации

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{K}_X \mathbf{X}(t) + \mathbf{K}_F \mathbf{F}(t), \quad (3)$$

где прямоугольные матрицы \mathbf{K}_X и \mathbf{K}_F имеют размерности $m \times n$ и $m \times s$ соответственно и называются матрицами коэффициентов усиления стабилизатора.

Стабилизатор (3) использует информацию как о компонентах вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ стабилизируемого объекта, так и о компонентах вектора

возмущения $\mathbf{F}(t)$, действующего на объект. Стабилизатор (3) совмещает в себе два известных принципа управления: принцип регулирования по отклонению и принцип регулирования по возмущению, что придает замкнутой системе стабилизации свойство инвариантности к действию внешнего возмущения.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма выбора матриц коэффициентов усиления стабилизатора (3) \mathbf{K}_X и \mathbf{K}_F обеспечивающих требуемое качество замкнутой системы стабилизации.

Основная часть. Качество стабилизатора (3) количественно будем оценивать значением интегрального квадратичного функционала

$$I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = M_j \left\{ \int_0^T \langle \mathbf{X}(t), \mathbf{Q} \mathbf{X}(t) \rangle dt \right\}, \quad (4)$$

вычисленного на решениях замкнутой системы (1), (2) и (3), где \mathbf{Q} – квадратная симметрическая сylvестрова матрица; M_j – символ математического ожидания по реализации векторного “белого шума” $\xi_j(t)$, ($j = \overline{1, N}$).

Обычно в качестве матрицы \mathbf{Q} используется диагональная матрица

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \beta_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \beta_n^2 \end{bmatrix},$$

где β_i^2 , ($i = \overline{1, n}$) – весовые коэффициенты функционала (4), подлежащие выбору. Тогда функционал (4), может быть записан в виде

$$I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = M_j \left\{ \int_0^T [\beta_1^2 x_1^2(t) + \beta_2^2 x_2^2(t) + \dots + \beta_n^2 x_n^2(t)] dt \right\}. \quad (5)$$

Пусть элементы матриц \mathbf{K}_X и \mathbf{K}_F удовлетворяют ограничениям

$$\mathbf{K}_X \in \mathbf{G}_X; \quad \mathbf{K}_F \in \mathbf{G}_F,$$

где \mathbf{G}_X – $m \times n$ -мерное множество допустимых значений элементов матрицы \mathbf{K}_X \mathbf{G}_F – $m \times s$ -мерное множество допустимых элементов матрицы \mathbf{K}_F

Для построения множеств \mathbf{G}_X и \mathbf{G}_F предлагается следующий алгоритм:

В уравнение (1) и соотношение (3) полагается $\mathbf{F}(t) = 0$; в результате приходим к однородному дифференциальному уравнению n -го порядка

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{BK}_X)\mathbf{X}(t); \quad (7)$$

В $m \times n$ -мерном пространстве элементов матрицы \mathbf{K}_X строим область устойчивости системы (7), используя метод D-разбиения в пространстве варьируемых параметров системы [1, 2]. Внутри построенной области \mathbf{G}_X выбираем точку $K_{X0}^* \in \mathbf{G}_{X0}$, в которой система (7) является асимптотически устойчивой.

Рассмотрим расширенную систему размерностью $n + s$, положив в (2) $\xi(t) = 0$, а в (3) $\mathbf{K}_X = K_X^*$:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= (\mathbf{A} + \mathbf{BK}_{X0}^*)\mathbf{X}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{BK}_F)\mathbf{F}(t); \\ \dot{\mathbf{F}}(t) &= \mathbf{DF}(t), \end{aligned} \quad (8)$$

В $m \times s$ -мерном пространстве элементов матрицы \mathbf{K}_F строим область устойчивости системы (8), (9) \mathbf{G}_{F0} и выбираем внутри этой области точку .

Переходим к рассмотрению расширенной однородной системы

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{BK}_X)\mathbf{X}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{BK}_F^*)\mathbf{F}(t); \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{F}}(t) = \mathbf{DF}(t); \quad (11)$$

Строим область устойчивости \mathbf{G}_{X1} и выбираем внутри этой области точку K_{X1}^* ; затем весь процесс повторяется p раз до выполнения неравенств

$$\|K_{Xp}^*\| - \|K_{Xp-1}^*\| \leq \varepsilon_X;$$

$$\|K_{Fp}^*\| - \|K_{Fp-1}^*\| \leq \varepsilon_F,$$

где ε_X и ε_F – заданные малые числа.

В результате полагаем $\mathbf{G}_X = \mathbf{G}_{Xn}$; $\mathbf{G}_F = \mathbf{G}_{Fn}$. Следующим шагом решения поставленной задачи является выбор весовых коэффициентов функционала (5), который представим в виде

$$I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = \sum_{i=1}^n \beta_i^2 I_i(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F), \quad (12)$$

где

$$I_i(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = M_j \left\{ \int_0^T x_i^2(t) dt \right\}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (13)$$

Функционалы (13) имеют различные размерности, следовательно, различные размерности должны иметь также весовые коэффициенты β_i , $(i = \overline{1, n})$.

В этой связи введем обозначения [3]

$$\bar{I}_i^{(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F)} = \frac{1}{x_{i\max}^2} M_j \left\{ \int_0^T x_i^2(t) dt \right\} = \frac{I_i(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F)}{x_{i\max}^2}; \quad (14)$$

$$\bar{\beta}_i = \beta_i x_{i\max}; \quad (i = \overline{1, n}), \quad (15)$$

где $x_{i\max}$ – максимально допустимое значение компоненты $X_i(t)$ вектора состояния $\mathbf{X}(t)$. Тогда функционал (12) принимает вид

$$I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i^2 \bar{I}_i(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F), \quad (16)$$

причем в соотношении (16) все функционалы (14) имеют одинаковые размерности, а весовые коэффициенты (15) безразмерны.

Минимизация функционала (16) по $\mathbf{K}_X \in \mathbf{G}_X$ и $\mathbf{K}_F \in \mathbf{G}_F$ при заданных значениях весовых коэффициентов $\bar{\beta}_i$, $(i = \overline{1, n})$ не вызывает затруднений. В то же время попытка минимизации функционала (16) по $\bar{\beta}_i$, $(i = \overline{1, n})$ без ограничений на эти коэффициенты приводит к тривиальному решению $\bar{\beta}_i = 0$, $(i = \overline{1, n})$ при котором функционал (16) обращается в нуль. Во избежание этого на величины коэффициентов $\bar{\beta}_i$, $(i = \overline{1, n})$ наложим ограничение

$$\sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i = 1. \quad (17)$$

Обозначим через \bar{I}_i^* , $(i = \overline{1, n})$ минимальные значения функционалов (14), которые имеют место при минимизации по $\mathbf{K}_X \in \mathbf{G}_X$ и $\mathbf{K}_F \in \mathbf{G}_F$

каждого из этих функционалов в отдельности. Тогда при фиксированных значениях весовых коэффициентов $\bar{\beta}_i, (i = \overline{1, n})$ минимально возможное значение функционала (16) составляет

$$I = \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i^{-2} \bar{I}_i^* \quad (18)$$

Отыщем минимум функционала (18) $\bar{\beta}_i, (i = \overline{1, n})$ при ограничении (17). Для решения этой задачи на условный экстремум построим функцию Лагранжа

$$F = \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i^{-2} \bar{I}_i^* + \lambda \left(1 - \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i \right) \quad (19)$$

и запишем условия минимума функции (19)

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{\beta}_i} = 2\bar{\beta}_i^{-3} \bar{I}_i^* - \lambda = 0; \quad (20)$$

Из уравнений (20) получаем

$$\bar{\beta}_i = \frac{\lambda}{2\bar{I}_i^*}; \quad (i = \overline{1, n}). \quad (21)$$

Подставим соотношения (21) в формулу (17). В результате имеем.

$$\lambda = \frac{2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{I}_i^*}}. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21), получаем нормированные значения весовых коэффициентов функционала (16)

$$\bar{\beta}_i = \frac{1}{\bar{I}_i^* \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{I}_i^*}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (23)$$

С учетом формул (14) и (15) соотношения (23) принимают вид

$$\beta_i = \frac{x_{i \max} 1}{I_i^* \sum_{i=1}^n \frac{x_{i \max}^2}{I_i^*}}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (24)$$

Минимальные значения функционалов I_i , ($i = \overline{1, n}$), а затем, после отыскания весовых коэффициентов (24), и аддитивного функционала (5), отыскиваются в результате решения задачи нелинейного программирования или поиска минимума функции $I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F)$, вычисляемой на решениях замкнутой системы (1), (2), (3) при N реализациях вектора “белого шума” $\xi(t)$, по $\mathbf{K}_X \in \mathbf{G}_X$ и $\mathbf{K}_F \in \mathbf{G}_F$. К уравнениям возмущенного движения замкнутой системы стабилизации

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= (\mathbf{A} + \mathbf{BK}_X^*)\mathbf{X}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{BK}_F)\mathbf{F}(t); \\ \dot{\mathbf{F}}(t) &= \mathbf{DF}(t) + \mathbf{E}\xi(t), \end{aligned} \quad (25)$$

добавим уравнение

$$\dot{x}_{n+1}(t) = \beta_1^2 x_1^2(t) + \beta_2^2 x_2^2(t) + \dots + \beta_n^2 x_n^2(t). \quad (26)$$

Интегрируя систему дифференциальных уравнений $n+s+1$ порядка на интервале $[0, T]$ с нулевыми начальными условиями $\mathbf{X}(0) = 0$; $\mathbf{F}(0) = 0$; $x_{n+1}(0) = 0$ при различных реализациях векторного “белого шума” $\xi_j(t)$, ($j = \overline{1, N}$), получаем

$$I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{n+1}^j(t, \mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F), \quad (27)$$

где $x_{n+1}^j(t, \mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F)$ – решение уравнения (26) при j -ой реализации векторного “белого шума” $\xi_j(t)$, ($j = \overline{1, N}$).

Если векторный случайный процесс $\mathbf{X}(t)$ является стационарным или квазистационарным, то в этом случае функция (27) может быть вычислена при единственной реализации векторного “белого шума”.

$$I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = x_{n+1}(t, \mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F). \quad (28)$$

В общем случае функции (27) и (28) являются функциями $(m \times n) + (m \times s) = m \times (n + s)$ аргументов, являющихся варьируемыми параметрами системы. Оптимальные значения этих параметров отыскиваются путем решения задачи нелинейного программирования [4]

$$\min_{\mathbf{K}_X \in \mathbf{G}_X} \min_{\mathbf{K}_F \in \mathbf{G}_F} I(\mathbf{K}_X, \mathbf{K}_F) = I(\mathbf{K}_X^*, \mathbf{K}_F^*),$$

где K_X^* , K_F^* – оптимальные значения матричных варьируемых параметров, доставляющих минимум функциям (27) и (28).

Выводы. Предложена методика синтеза оптимальной системы стабилизации, инвариантной к действию внешних возмущений. Свойство инвариантности достигается путем использования в алгоритме стабилизации информации о внешних возмущениях, действующих на объект стабилизации. Предложена методика выбора весовых коэффициентов аддитивного квадратичного интегрального критерия качества, являющегося количественной оценкой точности системы стабилизации.

Список литературы: 1. Александров С. С. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т. 1. Теорія автоматичного керування / С. С. Александров, Е. П. Козлов, Б. І. Кузнецов. – Харків : НТУ «ХПІ», 2002. – с. 2. Александрова Т. Е. Построение областей устойчивости сложных систем в плоскости варьируемых параметров // Т. Е. Александрова, И. В. Костяник // Колесные и гусеничные машины специального назначения. Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 28. – С. 23–28. 3. Александров Е. Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации // Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2004. – № 2(11). – С. 23–26. 4. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 536 с.

Надійшла до редколегії 30.10.2013

УДК 62-503.4

К вопросу синтеза линейных инвариантных систем стабилизации / Т. Е. Александрова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 152–158. – Бібліогр.: 4 назв.

Запропоновано методику синтезу лінійних інваріантних систем стабілізації, що включає вибір вагових коефіцієнтів інтегрального квадратичного функціоналу якості.

Ключові слова: система стабілізації, інваріантність, інтегральний квадратичний функціонал.

Proposed the technique of the synthesis of linear invariant stabilization systems, including the choice of weighting coefficients of the integral quadratic functional quality.

Keywords: stabilization system, invariance, integral quadratic functional.

ЗМІСТ

<i>Дорофеев Ю. И., Куценко А. С.</i> Стабилизирующее управление запасами в сетях поставок с ограничениями в условиях неопределенного стохастического спроса	3
<i>Никульченко А. А.</i> Применение генетических алгоритмов при расчете оптимального плана дистрибуции товаров	15
<i>Кротов К. В., Шишкевич В. Е.</i> Модель многоуровневого программирования построения расписаний обработки требований комплектов различных типов (при формировании групп партий)	21
<i>Зройчикова Е. В., Путятин Е. П.</i> Сравнительный анализ разложений аффинных преобразований в задаче нормализации изображений	40
<i>Шипулина Л. В., Татарина О. А., Кoryтко Ю. Н.</i> Управление переориентацией космического аппарата с ограничением на ориентацию	48
<i>Маркарян Г. О.</i> Система управління та моніторингу кредитних операцій як інструментарій протидії легалізації доходів, одержаних злочинним шляхом	53
<i>Евсеев С. П., Король О. Г.</i> Портативные средства криптографической защиты конфиденциальных данных	61
<i>Гамаюн И. П., Безменова О. Н.</i> Некоторые методы решения задач классификации объектов и группировки параметров	70
<i>Миунхин С. В., Сухонос М. И.</i> Алгоритмы, программная архитектура и информационная технология моделирования методов масштабирования скоростей параллельных процессоров вычислительного кластера	78
<i>Каткова Т. И.</i> Экономико-математическая модель задачи выбора стратегических направлений деятельности предприятия	92
<i>Годлевский М. Д., Брагинский И. Л., Бабина А. С., Рычко Г. Г.</i> Результаты исследования информационной технологии управления качеством процесса разработки программного обеспечения на основе полноразмерной исходной информации	105
<i>Селякова С. М.</i> Двухуровневая модель принятия решений в случае зависимости весов критериев от состояний внешней среды	111
<i>Петрасова С. В., Кочужева З. А., Хайрова Н. Ф.</i> Метод автоматической экстракции парадигматических отношений между понятиями толкового словаря	118
<i>Міненко О. С., Хазієва А. Т.</i> Дослідження видів перестраховування та розробка системи оптимального перестрахового захисту портфеля страхової компанії	125
<i>Шевчук О. А.</i> Формализация процесса планирования деятельности строительно-монтажной организации	130
<i>Сидоренко А. Ю., Потапенко А. И.</i> Применение воксельной модели при моделировании электронного облака	136
<i>Александрова Т. Е.</i> Цифровой стабилизатор лазерного луча танкового прицела-дальномера	143
<i>Александрова Т. Е.</i> К вопросу синтеза линейных инвариантных систем стабилизации	152

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Системний аналіз, управління
та інформаційні технології

№ 62 (1035)

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. М. Д. Годлевський,
д-р техн. наук, проф. О. С. Куценко
Технічний редактор канд. техн. наук, проф. М. І. Безменов
Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра системного аналізу і управління.
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид № 50–13.

Підп. до друку 23.12.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,3. Облік.-вид. арк. 10,2.
Тираж 300 пр. (1-й запуск 1–100) Зам. № 172. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня «ФОП Стеценко І. І.»
Свідоцтво про державну реєстрацію ХК № 82 від 22.04.2003 р.
61019, Харків, пр. Ілліча, 103а, кв. 21, тел. (057) 758-17-35